

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2004-086070
(43)Date of publication of application : 18.03.2004

(51)Int.Cl. G02B 6/12
G02B 6/13

(21)Application number : 2002-249691 (71)Applicant : MATSUSHITA ELECTRIC
IND CO LTD
(22)Date of filing : 28.08.2002 (72)Inventor : HAMADA HIDENOBU

(54) SLAB WAVEGUIDE AND MANUFACTURING METHOD FOR SLAB
WAVEGUIDE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To realize a slab type photonic crystal satisfying a single mode condition, and simultaneously reducing coupling loss with an optical fiber.

SOLUTION: The slab waveguide is equipped with a slab having a plurality of slab refractive index portions 1 and voids 2 formed between the slab refractive index portions 1. The number, the shape, the size and the refractive index of the slab refractive index portions 1 and the number, the shape and the refractive index of the voids 2 are set so that the size of an incident beam in a slab thickness direction obtained when the incident beam expands to a maximum extent does not exceed the slab thickness.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 06.04.2005

[Date of sending the examiner's decision
of rejection]

[Kind of final disposal of application
other than the examiner's decision of
rejection or application converted
registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of requesting appeal against
examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号
特開2004-86070
(P2004-86070A)

(43) 公開日 平成16年3月18日(2004.3.18)

(51) Int. Cl.⁷
G02B 6/12
G02B 6/13

F I
G02B 6/12
G02B 6/12

テーマコード (参考)
2H047
Z
M

審査請求 未請求 請求項の数 21 O L (全 32 頁)

(21) 出願番号	特願2002-249691 (P2002-249691)	(71) 出願人	000005821
(22) 出願日	平成14年8月28日 (2002. 8. 28)		松下電器産業株式会社
			大阪府門真市大字門真1006番地
		(74) 代理人	100092794
			弁理士 松田 正道
		(72) 発明者	浜田 英伸
			大阪府門真市大字門真1006番地 松下
			電器産業株式会社内
		Fターム(参考)	2H047 KA02 PA01 PA11 PA13 PA24

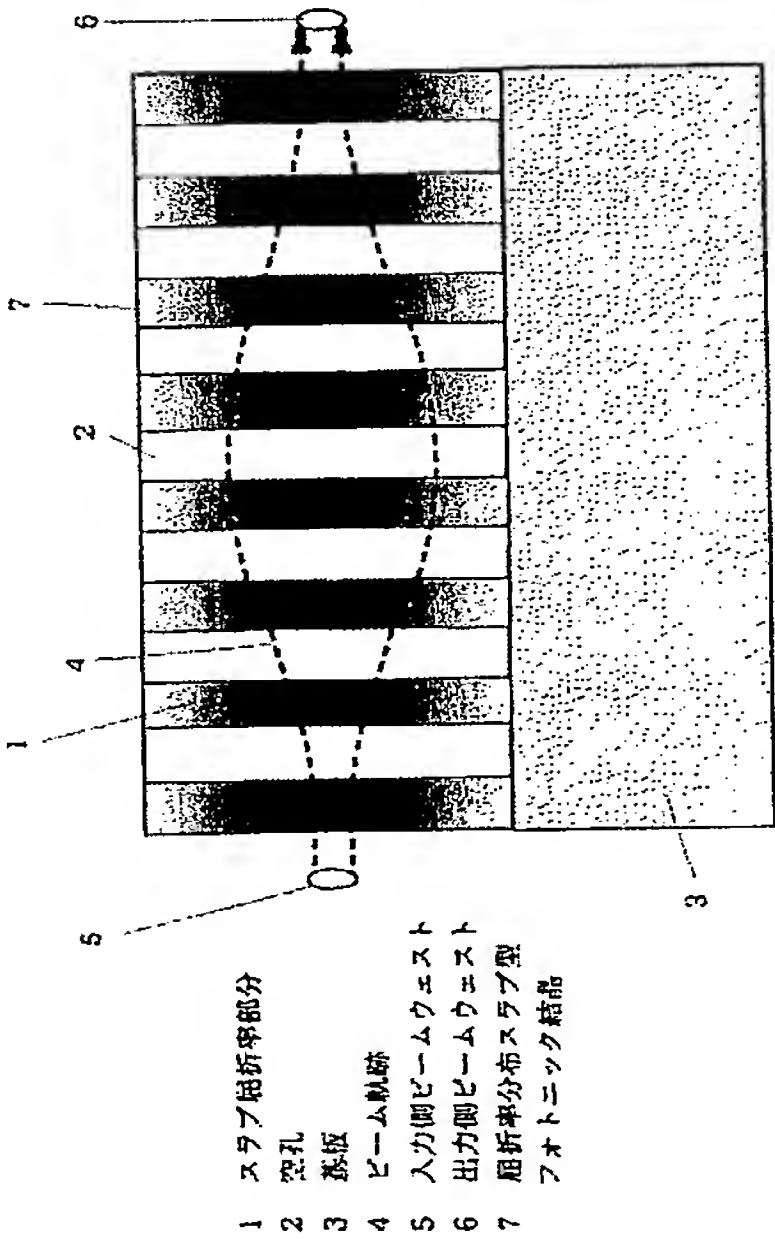
(54) 【発明の名称】 スラブ導波路、及びスラブ導波路の製造方法

(57) 【要約】

【課題】 光ファイバーとの結合ロスを低減すると同時に、シングモード条件を満足するスラブ型フォトニック結晶を実現すること。

【解決手段】 複数のスラブ屈折率部分1を有するスラブと、前記スラブ屈折率部分1の間に形成されている空孔2とを備え、前記スラブ屈折率部分1の個数及び形状及び大きさ及び屈折率と、前記空孔2の個数及び形状及び個数とが、入射されてきた光束が最も広がる際の、前記スラブ厚さ方向の前記光束の大きさが、前記スラブ厚さを越えないように構成されている。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

スラブ中に前記スラブの屈折率とは異なる屈折率を有する柱状物質を前記スラブ面に沿って 2 次元周期的に配列した 2 次元結晶格子を備え、

前記スラブ中の前記柱状物質部分以外のスラブ屈折率部分の屈折率と、前記柱状物質の個数及び形状及び屈折率とが、入射されてきた光束が最も広がる際の、前記スラブ厚さ方向の前記光束の大きさが、前記スラブ厚さを越えないように構成されているスラブ導波路。

【請求項 2】

前記スラブ屈折率部分は、屈折率の分布が一様でない請求項 1 記載のスラブ導波路。

【請求項 3】

前記スラブ屈折率部分の前記スラブ面と直交する方向の屈折率は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定部分において最大であり、前記所定部分からの距離の 2 次関数に従って低下する請求項 2 記載のスラブ導波路。

【請求項 4】

前記スラブ屈折率部分の前記スラブ面と直交する方向の屈折率は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定の長さの領域において実質上一定であり、前記所定の長さの領域の端部からの距離の 2 次関数に従って低下する請求項 2 記載のスラブ導波路。

【請求項 5】

前記距離の 2 次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定数は、 1 mm^{-1} 以上である請求項 3 または 4 に記載のスラブ導波路。

【請求項 6】

前記距離の 2 次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定数は、全光路長が光学的に 0.5 の整数倍のピッチとなるような屈折率分布定数である請求項 3 または 4 に記載のスラブ導波路。

【請求項 7】

前記距離の 2 次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定数は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離との和が、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質とで構成される構成単位の長さと等しくなるような屈折率分布定数である請求項 3 または 4 に記載のスラブ導波路。

【請求項 8】

前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質との境界面のうち、少なくとも 1 つの境界面は曲面を有している請求項 1 記載のスラブ導波路。

【請求項 9】

前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質との境界面は、前記スラブの膜厚方向に曲面を有する請求項 8 記載のスラブ導波路。

【請求項 10】

前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質との境界面は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定の長さの領域で平面を有し、前記所定の長さの領域の外側で前記スラブの膜厚方向に曲面を有する請求項 8 記載のスラブ導波路。

【請求項 11】

前記曲面の曲率半径は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離との和が、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質とで構成される構成単位の長さと等しくなるような曲率半径である請求項 9 または 10 に記載のスラブ導波路。

【請求項 12】

前記曲面の曲率半径は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離とが等しくなるような曲率半径である請求項 11 記載のスラブ導波路。

【請求項 13】

前記曲面の曲率半径は、 $0.1 \mu\text{m}$ 以上である請求項 9 または 10 に記載のスラブ導波路。

【請求項 14】

。

10

20

30

40

50

屈折率が異なり孔のあいた複数のフィルムを前記孔の位置をあわせながら積層して積層体を形成する積層工程を備え、
前記積層体のフィルム部分はスラブとして機能するものであり、
前記孔の部分は柱状物質として機能するものであるスラブ導波路の製造方法。

【請求項 15】

前記複数のフィルムのうち、最も屈折率が高いフィルムが前記積層体の端部以外の位置に位置し、その最も高い屈折率のフィルムから離れるに従って、順番に低い屈折率のフィルムが前記積層体として積層される請求項 14 記載のスラブ導波路の製造方法。

【請求項 16】

前記積層工程は、前記複数のフィルムのうちのフィルムを前記積層体に積層する際にその積層するフィルムのフィルム面と垂直に単一波長光を照射し、前記積層体からの干渉光に基づいてその積層するフィルムを位置決めすることによって前記孔の位置を膜厚方向に揃える請求項 14 記載のスラブ導波路の製造方法。

【請求項 17】

屈折率が異なる複数のフィルムを積層して積層体を形成する積層工程と、
その形成された積層体に孔を形成する柱状物質形成工程とを備え、
前記積層体のフィルム部分はスラブとして機能するものであり、
前記孔の部分は柱状物質として機能するものであるスラブ導波路の製造方法。

【請求項 18】

前記積層工程は、その端部以外の部分で最高屈折率となる屈折率分布となるように、屈折率の異なる厚膜フィルムを積層して屈折率分布型厚膜積層体を形成する厚膜積層体形成工程と、

前記屈折率分布型厚膜積層体の膜厚が所望の膜厚となるまで前記屈折率分布型厚膜積層体を積層方向にプレスするプレス工程とを有する請求項 17 記載のスラブ導波路の製造方法。

【請求項 19】

前記プレス工程は、少なくとも部分的に互いに非平行な面を有する 2 物体で前記屈折率分布型厚膜積層体を挟み込んで加重する請求項 18 記載のスラブ導波路の製造方法。

【請求項 20】

前記 2 物体は、水平な平面を有する第 1 の物体と、前記第 1 の物体の平面に平行な一方向に対して前記平面からの距離が単調変化する平面あるいは曲面を有する第 2 の物体である請求項 19 記載のスラブ導波路の製造方法。

【請求項 21】

フィルム状スラブ素材に対して、上下面を通して前記フィルム状スラブ素材の内外へイオンの移動をさせることで屈折率分布を形成する屈折率分布形成工程と、
その屈折率分布が形成された前記フィルム状スラブ素材に孔をあける柱状物質形成工程とを備え、

前記フィルム状スラブ素材の部分はスラブとして機能するものであり、
前記孔の部分は柱状物質として機能するものであるスラブ導波路の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光平面回路など、フォトリソグラフィや膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路、及びスラブ導波路の製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

まず、第 1 の従来例であるフォトリソグラフィで構成される基板付スラブ導波路を図 21 の (a)、(b) に示す。

【0003】

図 21 の (a) は、基板 201 上と、スラブ 203 中に前記基板 201 上に膜厚方向へ伸

び、かつ、前記基板 201 に平行方向に 2 次元周期的に配列する円柱状の空孔 202 を形成したスラブ型フォトニック結晶 200 で構成され、前記スラブ 203 の屈折率は均一で、かつ、前記基板 201 の屈折率よりも大きい。このようなスラブ型フォトニック結晶 200 をスラブ導波路として用いることにより、スラブ導波路内を伝搬する光の速度を遅くしたり、また光を波長分散させたり、また光の進行方向を曲げたりすることが出来るようになる。

【0004】

従来、フォトニック結晶の屈折率として周期的に配列する複数物質の屈折率の体積比で定義される実行屈折率を用いてフォトニック結晶内の光伝搬を議論していたが、このようなマクロ的議論は屈折率周期が光波長よりも十分小さい時には光は屈折率を平均的に感じるため有効である。しかし、屈折率周期が光波長と同程度の場合は、光は個々の屈折率を感じるため周期的に配列する異なる屈折率材料を個々に取り扱うようなミクロ的議論をしなければならない。

【0005】

確かに、マクロ的議論では空孔 202 の屈折率と前記スラブ 203 の屈折率を平均した実効屈折率よりも小さな屈折率の基板 201 を使用すれば光は前記スラブ型フォトニック結晶 200 内を伝搬すると予想される。しかし、ミクロ的議論では、このような基板付スラブ導波路の前記スラブ型フォトニック結晶 200 の入射光 204 は、周期的に配列するスラブ 203 部分では基板 201 よりも屈折率の大きなスラブ 203 部分を伝搬するが、前記空孔 202 部分では基板 201 よりも屈折率が小さいため、拡散光 206 は屈折率の高い基板 201 側に漏れ、一部しか空孔 202 を伝搬できない。従って、前記スラブ型フォトニック結晶 200 からの出射光 205 は、ほとんど 0 となる。

【0006】

また、図 21 の (b) に示すように、空孔 202 を基板 201 内に延長した基板部分空孔 207 を設けて、基板 201 部分の実効屈折率を下げた基板付スラブ導波路に関しても、同様に光は前記スラブ型フォトニック結晶 200 内を伝搬しない。

【0007】

次に、第 2 の従来例であるフォトニック結晶で構成される基板無スラブ導波路を図 21 (c) 及び (d) に示す。

【0008】

図 21 の (c) と (d) とは膜厚が異なるだけで、両者とも、スラブ 203 中に前記スラブ 203 の膜厚方向へ伸び、かつ、前記スラブ 203 に平行方向に 2 次元周期的に配列する円柱状の空孔 202 を形成したスラブ型フォトニック結晶 200 で構成され、前記スラブ 203 の屈折率は均一である。

【0009】

このように、基板が無く、前記スラブ型フォトニック結晶 200 のみで構成される場合には、前記スラブ型フォトニック結晶 200 はレンズ導波路のように振舞い、屈折率の高いスラブ部がレンズとなり屈折率の低い空孔部 202 での拡散による漏れが起こらないので、入射光 204 は拡散せずに前記スラブ型フォトニック結晶 200 内を伝搬する。

【0010】

しかし、図 21 の (c) と (d) とのよう膜厚が異なる場合には、光の伝搬状態が異なる。図 21 の (c) の膜厚が数 μm 以下程度の場合は、屈折率の高いスラブ 203 部分において前記スラブ膜厚方向の空気との境界で光が反射してマルチモード伝搬となる。従って、シングルモード条件を満足するためにスラブ膜厚を $1\mu\text{m}$ 以下としなければならない。この場合、前記スラブ型フォトニック結晶 200 内での伝搬は問題無いが、コア径 $8\mu\text{m}$ 程度の光ファイバーとのモードフィールド径が異なるため光ファイバーとの結合ロスが大きくなる。

【0011】

一方、図 21 の (d) の膜厚が $10\mu\text{m}$ 程度以上と大きい場合は、屈折率の高いスラブ部分において前記スラブ膜厚方向の空気との境界での反射が起こらないので、理想的なレン

ズ導波路となりシングルモード伝搬となる。その上、光ファイバーとのモードフィールドとの差が無いので、光ファイバーとの結合ロスも小さい。しかし、この場合には、膜厚 $10\mu\text{m}$ 以上で光と同程度の周期、すなわち、アスペクト比が 50 以上の空孔を作製する必要があり、現時点ではそのような高いアスペクト比を実現するのは非常に困難である。

【0012】

また、図 21 の (c) と (d) のいずれの場合も、実用化するには何らかの方法でスラブを補強する必要があり、基板に相当するものを念頭においてデバイス設計する必要がある。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】

上記従来例のように、均一屈折率のスラブに周期的に空孔を形成したスラブ型フォトニック結晶の場合は、下記 (1) ~ (3) を全て満足することが困難である。

【0014】

(1) 光ファイバーとモードフィールド径が近い。

【0015】

(2) 理想的なレンズ導波路のようにシングルモード条件を満足する。

【0016】

(3) 実用化に絶えうる強度を有する。

【0017】

従来の方法では、フォトニック結晶の空孔よりも基板の方が屈折率が高いため、空孔部分での光の漏れが生じ、光は伝搬できない。また、基板を使用しない光の漏れの無いスラブだけの構成にしてもシングルモード条件を満足するためにはスラブの膜厚を $1\mu\text{m}$ 以下に薄くするか、 $10\mu\text{m}$ 以上に厚くする必要があり、前記は光ファイバーとの結合が困難で、後者は作製が非常に困難である。しかも、スラブだけでは強度が弱く、実用化には耐えられない。

【0018】

本発明は、従来のスラブ導波路の課題を考慮し、光ファイバーとモードフィールド径が近く、理想的なレンズ導波路のようにシングルモード条件を満足し、実用化に絶えうる強度を有するスラブ型フォトニック結晶で構成されるスラブ導波路、及びスラブ導波路の製造方法を提供することを目的とするものである。

【0019】

【課題を解決するための手段】

上述した課題を解決するために、第 1 の本発明は、スラブ中に前記スラブの屈折率とは異なる屈折率を有する柱状物質を前記スラブ面に沿って 2 次元周期的に配列した 2 次元結晶格子を備え、

前記スラブ中の前記柱状物質部分以外のスラブ屈折率部分の屈折率と、前記柱状物質の個数及び形状及び屈折率とが、入射されてきた光束が最も広がる際の、前記スラブ厚さ方向の前記光束の大きさが、前記スラブ厚さを越えないように構成されているスラブ導波路である。

【0020】

また、第 2 の本発明は、前記スラブ屈折率部分は、屈折率の分布が一様でない第 1 の本発明のスラブ導波路である。

【0021】

また、第 3 の本発明は、前記スラブ屈折率部分の前記スラブ面と直交する方向の屈折率は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定部分において最大であり、前記所定部分からの距離の 2 次関数に従って低下する第 2 の本発明のスラブ導波路である。

【0022】

また、第 4 の本発明は、前記スラブ屈折率部分の前記スラブ面と直交する方向の屈折率は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定の長さの領域において実質上一定であり、前記所定の長さの領域の端部からの距離の 2 次関数に従って低下する第 2 の本発明のスラブ導

10

20

30

40

50

波路である。

【0023】

また、第5の本発明は、前記距離の2次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定数は、 1 mm^{-1} 以上である第3または4の本発明のスラブ導波路である。

【0024】

また、第6の本発明は、前記距離の2次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定数は、全光路長が光学的に0.5の整数倍のピッチとなるような屈折率分布定数である第3または4の本発明のスラブ導波路である。

【0025】

また、第7の本発明は、前記距離の2次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定数は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離との和が、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質とで構成される構成単位の長さと同様となるような屈折率分布定数である第3または4の本発明のスラブ導波路である。

【0026】

また、第8の本発明は、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質との境界面のうち、少なくとも1つの境界面は曲面を有している第1の本発明のスラブ導波路である。

【0027】

また、第9の本発明は、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質との境界面は、前記スラブの膜厚方向に曲面を有する第8の本発明のスラブ導波路である。

【0028】

また、第10の本発明は、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質との境界面は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定の長さの領域で平面を有し、前記所定の長さの領域の外側で前記スラブの膜厚方向に曲面を有する第8の本発明のスラブ導波路である。

【0029】

また、第11の本発明は、前記曲面の曲率半径は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離との和が、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質とで構成される構成単位の長さと同様となるような曲率半径である第9または10の本発明のスラブ導波路である。

【0030】

また、第12の本発明は、前記曲面の曲率半径は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離とが等しくなるような曲率半径である第11の本発明のスラブ導波路である。

【0031】

また、第13の本発明は、前記曲面の曲率半径は、 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 以上である第9または10の本発明のスラブ導波路である。

【0032】

また、第14の本発明は、屈折率が異なり孔のあいた複数のフィルムを前記孔の位置をあわせながら積層して積層体を形成する積層工程を備え、前記積層体のフィルム部分はスラブとして機能するものであり、前記孔の部分は柱状物質として機能するものであるスラブ導波路の製造方法である。

【0033】

また、第15の本発明は、前記複数のフィルムのうち、最も屈折率が高いフィルムが前記積層体の端部以外の位置に位置し、その最も高い屈折率のフィルムから離れるに従って、順番に低い屈折率のフィルムが前記積層体として積層される第14の本発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0034】

また、第16の本発明は、前記積層工程は、前記複数のフィルムのうちのフィルムを前記積層体に積層する際にその積層するフィルムのフィルム面と垂直に単一波長光を照射し、前記積層体からの干渉光に基づいてその積層するフィルムを位置決めすることによって前記孔の位置を膜厚方向に揃える第14の本発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0035】

また、第17の本発明は、屈折率が異なる複数のフィルムを積層して積層体を形成する積層工程と、
その形成された積層体に孔を形成する柱状物質形成工程とを備え、
前記積層体のフィルム部分はスラブとして機能するものであり、
前記孔の部分は柱状物質として機能するものであるスラブ導波路の製造方法である。

【0036】

また、第18の本発明は、前記積層工程は、その端部以外の部分で最高屈折率となる屈折率分布となるように、屈折率の異なる厚膜フィルムを積層して屈折率分布型厚膜積層体を形成する厚膜積層体形成工程と、
前記屈折率分布型厚膜積層体の膜厚が所望の膜厚となるまで前記屈折率分布型厚膜積層体を積層方向にプレスするプレス工程とを有する第17の本発明のスラブ導波路の製造方法である。

10

【0037】

また、第19の本発明は、前記プレス工程は、少なくとも部分的に互いに非平行な面を有する2物体で前記屈折率分布型厚膜積層体を挟み込んで加重する第18の本発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0038】

また、第20の本発明は、前記2物体は、水平な平面を有する第1の物体と、前記第1の物体の平面に平行な一方向に対して前記平面からの距離が単調変化する平面あるいは曲面を有する第2の物体である第19の本発明のスラブ導波路の製造方法である。

20

【0039】

また、第21の本発明は、フィルム状スラブ素材に対して、上下面を通して前記フィルム状スラブ素材の内外へイオンの移動をさせることで屈折率分布を形成する屈折率分布形成工程と、
その屈折率分布が形成された前記フィルム状スラブ素材に孔をあける柱状物質形成工程とを備え、
前記フィルム状スラブ素材の部分はスラブとして機能するものであり、
前記孔の部分は柱状物質として機能するものであるスラブ導波路の製造方法である。

30

【0040】

この目的を達成するため本発明は、スラブ中に前記スラブの膜厚方向に空孔を2次元周期的に配列した前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質部分で構成される2次元結晶格子を有するスラブ型フォトニック結晶であって、前記スラブ屈折率部分の膜厚方向の屈折率が、前記スラブ膜厚内のある部分において最大となる屈折率最大部分と、前記屈折率最大部分からの距離の2次関数に沿って屈折率が低下する屈折率低下部分から構成され、前記屈折率低下部分の屈折率分布定数が 1 mm^{-1} 以上である。

【0041】

このように、膜厚方向に屈折率分布定数が 1 mm^{-1} 以上の2次分布屈折率変化を有する前記スラブ型フォトニック結晶を使用することにより、前記スラブ型フォトニック結晶の膜厚に関係なく基板付の場合でも光は漏れなく伝搬でき、シングルモード条件を満足することができる上、光ファイバーのモードフィールド径合うように膜厚も設定できる。

40

【0042】

上記膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ型フォトニック結晶の作製方法は、下記に大別できる。

【0043】

(1) 屈折率が異なる複数のフィルムを積層して屈折率分布を有するスラブ導波路を作製した後、膜厚方向に2次元周期的に配置する空孔を作製する。

【0044】

(2) 屈折率が異なる個々のフィルムの膜厚方向に2次元周期的に空孔を配列し、前記空孔位置が一致するように前記フィルムを積層方向に所望の屈折率分布となる順番に積層す

50

る。

【0045】

【発明の実施の形態】

以下に、本発明の実施の形態を図面を参照して説明する。

【0046】

(第1の実施の形態)

図1に、第1の実施の形態のスラブ導波路の構成概要断面図を示す。また、図2に第1の実施の形態のスラブ導波路の斜視図を示す。本実施の形態のスラブ導波路は、図2のスラブ屈折率部分の屈折率分布301に示すように膜厚方向に2次分布屈折率変化を有するスラブ型フォトニック結晶を応用したものである。

10

【0047】

すなわち、本実施の形態のスラブ導波路は、スラブ中の柱状物質である空孔2の部分以外のスラブ屈折率部分1の屈折率と、柱状物質である空孔2の個数及び形状及び屈折率とが、入射されてきた光束が最も広がる際の、スラブ厚さ方向の光束の大きさが、スラブ厚さを越えないように構成されている。

【0048】

また、図3に、スラブ屈折率が約1.5である場合において、入射側と出射側とでスポット径が等しくなるようなスラブ導波路の全光路長が光学的に0.5の整数倍のピッチとなる屈折率分布定数($A^{1/2}$)と、前記スラブ型フォトニック結晶の総周期数との関係を示す。

20

【0049】

本スラブ型フォトニック結晶を応用したスラブ導波路の第1の実施の形態は、図1及び図2に示すように、基板3と、前記基板3上のスラブ中に前記スラブの膜厚方向に伸びる空孔2を2次元周期的に配列したものであって、前記スラブ屈折率部分1と空孔2で構成される2次元結晶格子を有するスラブ型フォトニック結晶7で構成される。つまり、本実施の形態のスラブ導波路は、スラブ中にスラブの屈折率とは異なる屈折率を有する空孔をスラブ面に沿って2次元周期的に配列した構造を有している。また、前記スラブの膜厚方向の屈折率(n)は、式1に示すように前記スラブ膜厚内に有する屈折率の極大点(n_0)と前記極大点から離れる距離(r)と 1mm^{-1} 以上の屈折率分布定数($A^{1/2}$)で定義される。

30

【0050】

【数1】

$$n = n_0 \left(1 - A \frac{r^2}{2} \right)$$

式1

【0051】

図1に示すように、前記スラブ導波路の全光路長が光学的に0.5ピッチとなる屈折率分布定数($A^{1/2}$)を選ぶと、入射側と出射側でビーム形状が等しくなる。すなわち、前記スラブ導波路を伝搬するビームの軌跡4は、ビームウエストを入射端前に有する広がり入射光の場合(図1)は前記スラブ導波路内で徐々に広がり角度が小さくなり、全光路長のほぼ中央で広がり角度が0となった後は、収束光となり前記スラブ導波路出射端後にビームウエストを持つ。

40

【0052】

図3より、屈折率が約1.5のスラブの場合、総周期が5周期以上の一般的なスラブ型フォトニック結晶では約 0.03mm^{-1} ($=30\text{mm}^{-1}$)の屈折率分布定数($A^{1/2}$)でスラブ導波路の全光路長が光学的に0.5の整数倍のピッチとなることがわかる。

【0053】

なお、上記屈折率分布は、図17の(a)に示す2次曲線に沿った例であるが、それ以外に、図17の(b)に示すように、中央近傍の有限領域において最大屈折率で一定な屈折

50

率一定部分と、前記屈折率一定部分の端からの距離の2次曲線に沿って屈折率が低下する屈折率低下部分で構成される屈折率分布の例も挙げられる。

【0054】

(第2の実施の形態)

次に、第2の実施の形態について説明する。

【0055】

図4に、第2の実施の形態におけるスラブ導波路の構成概要断面図を示す。本実施の形態のスラブ導波路は、膜厚方向に2次分布屈折率変化を有するスラブ型フォトニック結晶を応用したものである。

【0056】

第2の実施の形態の、スラブ型フォトニック結晶を応用したスラブ導波路は、図4に示すように、基板3と、前記基板3上のスラブ中に前記スラブの膜厚方向に伸びる空孔2を2次元周期的に配列したものであって、前記スラブ屈折率部分1と空孔2で構成される2次元結晶格子を有するスラブ型フォトニック結晶37で構成される。また、前記スラブの膜厚方向の屈折率(n)は、式1に示すように前記スラブ膜厚内に有する屈折率の極大点(n_0)と前記極大点から離れる距離(r)と 1mm^{-1} 以上の屈折率分布定数($A^{1/2}$)で定義され、スラブ導波路を構成するスラブ屈折率部分1の1周期分の入射側焦点距離と出射側焦点距離の和が周期的に並ぶ前記スラブ屈折率部分1と前記空孔2で構成される2次元結晶格子の周期と等しくなる屈折率分布定数($A^{1/2}$)を有する。

【0057】

図4に示すように、前記スラブ導波路を構成するスラブ屈折率部分1の1周期分の入射側焦点距離と出射側焦点距離が互いに等しく、前記焦点距離の2倍が周期的に並ぶ前記スラブ屈折率部分1と前記空孔2で構成される2次元結晶格子の周期と等しくなる屈折率分布定数($A^{1/2}$)を選ぶ場合も、前記スラブ導波路の入射側と出射側でビーム形状が等しくなる。すなわち、前記スラブ導波路を伝搬するビームの軌跡31は、スラブ屈折率部分1の1周期分の入射側と出射側にビームウェスト(32、33)を持つので、前記スラブ型フォトニック結晶37の入射側と出射側にも対称的なビームウェスト(34、35)を持つ。

【0058】

前記スラブ屈折率部分1の1周期分の入射側と出射側にビームウェスト(32、33)を有する条件は、図3における総周期が1周期の場合に相当し、約 $0.15\mu\text{m}^{-1}$ ($=150\text{mm}^{-1}$)の屈折率分布定数($A^{1/2}$)となる。

【0059】

このように、膜厚方向に屈折率分布定数が 1mm^{-1} 以上の2次分布屈折率変化を有する前記スラブ型フォトニック結晶37を使用することにより、前記スラブ型フォトニック結晶37の膜厚に関係なくビーム軌跡は前記スラブ型フォトニック結晶37の膜厚内に収まり、基板付の場合でもビーム軌跡は基板との境界に達しないので光は漏れなく伝搬できる。

【0060】

さらに、膜厚方向の2次分布屈折率変化は任意の角度入射の光においても伝搬速度が等しくなるのでシングルモード条件を満足することができる。従って、スラブ型フォトニック結晶37は、光ファイバーのモードフィールド径合うように膜厚も設定できるので、光ファイバーと容易に結合可能である。

【0061】

なお、以上はスラブ屈折率が約1.5の場合を説明したが、上記屈折率分布定数($A^{1/2}$)を満足すれば屈折率は任意でよく、材料も光学的に透明であれば良い。一般的には、フォトニック結晶の構成としては、1.0~4.0程度の屈折率変調がよく使用され、上記のように固体スラブ(SiやGaAsやTiO₂などの高屈折材料やポリマーやガラスなどの低屈折率材料)に空孔を分布させる以外に、高屈折率材料のスラブ(SiやGaAsやTiO₂など)に低屈折率の柱状物質(ポリマーやガラスなど)を分布させるこ

10

20

30

40

50

とも可能である。また、上記に記載のポリマー材料として、アクリル系（PMMA、UVアクリレートポリマーなど）、エポキシ系、ポリイミド系、シリコン系などが挙げられる。なお、本実施の形態の空孔は本発明の柱状物質の例である。

【0062】

また、フォトニック結晶は屈折率が重要なので、上記材料以外でも上記屈折率の条件を満足する材料あれば固体（酸化物など誘電体全般）でも液体（水やエチレングリコールなど）でも気体（空気や不活性ガスなど）でも何でも良い。

【0063】

（第3の実施の形態）

次に、第3の実施の形態について説明する。

10

【0064】

図5に第3の実施の形態のスラブ導波路の構成概要断面図を示す。本実施の形態のスラブ導波路は、膜厚方向に入射端面と出射端面に曲面を有するスラブ型フォトニック結晶を応用したものである。また、図6に、スラブ屈折率が約1.5の場合の入射側と出射側でスポット径が等しくなるようなスラブ導波路が光学的にレンズとして機能する曲率半径と前記スラブ型フォトニック結晶の総周期数との関係を示す。

【0065】

本実施の形態のスラブ型フォトニック結晶を応用したスラブ導波路は、図5に示すように、基板43と、前記基板43上のスラブ中に前記スラブの膜厚方向に伸びる空孔42を2次元周期的に配列した前記スラブ屈折率部分41と空孔42で構成される2次元結晶格子

20

【0066】

図5に示すように、前記スラブ型フォトニック結晶47が入射側と出力側に同様のビームウェスト（焦点）を有するような光学的にレンズとして機能するように入力側端面45と出力側端面46の曲率半径を選ぶと、入射側と出射側でビーム形状が等しくなる。すなわち、前記スラブ導波路を伝搬するビームの軌跡44は、入射光は、入射端面で収束光に変換されるが、前記スラブ型フォトニック結晶47中での回折により、全光路長のほぼ中央でビームウェスト（最小ビームスポット）48を形成した後、広がり光となった光は、前記スラブ導波路出射端面で再び収束光に変換され、入射光と対称的なビーム形状となる。

30

【0067】

図6より、屈折率が約1.5のスラブの場合、入射端面45と出射端面46が前記スラブ型フォトニック結晶47の総周期数の約1/10倍 μm （総周期数の1/10倍に単位としてマイクロメートルを付けた長さ）の曲率半径を有すれば、スラブ導波路が光学的にレンズとして機能することがわかる。

【0068】

なお、上記スラブ導波路の端面の曲面は、図17の（c）に示す2次曲面であるが、それ以外に、図17の（d）に示すような非2次曲面や、図17の（e）に示すような中央近傍の非曲面（平面）部分と前記非曲面部分と周囲の曲面部分で構成される面や、図17の（f）に示すような回折表面を有するフレネルレンズ型の例も挙げられる。

40

【0069】

（第4の実施の形態）

次に、第4の実施の形態について説明する。

【0070】

図7に、第4の実施の形態のスラブ導波路の構成概要断面図を示す。

【0071】

すなわち、本実施の形態のスラブ導波路は、膜厚方向に2次分布屈折率変化を有するスラブ型フォトニック結晶を応用したものである。

【0072】

第4の実施の形態のスラブ型フォトニック結晶を応用したスラブ導波路は、図7に示すよ

50

うに、基板43と、前記基板43上のスラブ中に前記スラブの膜厚方向に伸びる空孔62を2次元周期的に配列したものであって、前記スラブ屈折率部分61と空孔62で構成される2次元結晶格子を有するスラブ型フォトニック結晶67で構成される。そして、前記スラブ屈折率部分61と空孔62の個々の境界が前記スラブの膜厚方向に曲面を有し、曲率半径は、前記スラブ屈折率部分61の1周期分の入射側焦点距離と出射側焦点距離の和が周期的に並ぶ前記スラブ屈折率部分61と前記空孔62で構成される2次元結晶格子の周期と等しい。

【0073】

すなわち、空孔62の形状は、スラブ膜厚方向の中央部分でその半径が小さく中央位置からスラブ面側に離れていくに従って、半径が大きくなるような形状である。そして、空孔62とスラブ屈折率部分61との境界面は、スラブ膜厚方向で2次関数に従った曲線になっている。

【0074】

図7に示すように、前記スラブ屈折率部分61の1周期分の入射側焦点距離と出射側焦点距離が互いに等しく、前記焦点距離の2倍が周期的に並ぶ前記スラブ屈折率部分61と前記空孔62で構成される2次元結晶格子の周期と等しくなる曲率半径を選ぶ場合も、前記スラブ導波路の入射側と出射側でビーム形状が等しくなる。すなわち、前記スラブ導波路を伝搬するビームの軌跡68は、スラブ屈折率部分61の1周期分の入射側と出射側にビームウェスト(63、64)を持つので、前記スラブ型フォトニック結晶67の入射側と出射側にも対称的なビームウェスト(65、66)を持つ。

【0075】

前記スラブ屈折率部分61の1周期分の入射側と出射側にビームウェスト(63、64)を有する条件は、図6における総周期が1周期の場合に相当し、約 $0.22\mu\text{m}^{-1}$ ($=220\text{mm}^{-1}$)の曲率半径となる。

【0076】

このように、入射端および出射端の曲率半径が $0.1\mu\text{m}^{-1}$ 以上の曲率半径を有する前記スラブ型フォトニック結晶47や、入射端および出射端 $0.1\mu\text{m}^{-1}$ 以上の曲率半径を有する個々のスラブ屈折率部分61と空孔62の周期配列で構成される前記スラブ型フォトニック結晶67を使用することにより、前記スラブ型フォトニック結晶47、67の膜厚に関係なくビーム軌跡は前記スラブ型フォトニック結晶の膜厚内に収まり、基板付の場合でもビーム軌跡は基板との境界に達しないので光は漏れなく伝搬できる。さらに、端面の曲率半径はレンズのように機能し、任意の角度入射の光においても伝搬速度が等しくなるのでシングルモード条件を満足することができる。従って、スラブ型フォトニック結晶は、光ファイバーのモードフィールド径合うように膜厚も設定できるので、容易に結合可能である。

【0077】

なお、以上はスラブ屈折率が約1.5の場合を説明したが、上記曲率半径を満足すれば屈折率は任意でよく、材料も光学的に透明であれば良い。一般的には、フォトニック結晶の構成としては、1.0~4.0程度の屈折率変調がよく使用され、上記のように固体スラブ(SiやGaAsや Ti_2O_3 などの高屈折材料やポリマーやガラスなどの低屈折率材料)に空孔を分布させる以外に、高屈折率材料のスラブ(SiやGaAsや Ti_2O_3 などに低屈折率の柱状物質(ポリマーやガラスなど)を分布させることも可能である。また、上記に記載のポリマー材料として、アクリル系(PMMA、UVアクリルレートポリマーなど)、エポキシ系、ポリイミド系、シリコン系などが挙げられる。

【0078】

また、フォトニック結晶は屈折率が重要なので、上記材料以外でも上記屈折率の条件を満足する材料あれば固体(酸化物など誘電体全般)でも液体(水やエチレングリコールなど)でも気体(空気や不活性ガスなど)でも何でも良い。

【0079】

なお、上記第1及び第2の実施の形態で説明した屈折率分布型スラブの屈折率分布のプロ

ファイルは、図17の(a)に示すように2次曲線だけでなく、図17の(b)に示すように中心付近で屈折率がほぼ一定となるハイブリッド型も可能である。

【0080】

また、上記第3及び第4の実施の形態で説明したスラブの入射端と出射端面の曲面のプロファイルは、図17の(c)に示すように2次曲面型だけでなく、図17の(d)に示すような非2次曲面型や、図17の(e)に示すような曲面と非曲面が混在するハイブリッド型や、図17の(f)に示すような回折を利用するフレネル型も可能である。

【0081】

また、以上は、図8の(a)のように基板71上にスラブ型フォトニック結晶70を形成した例であるが、第1の実施の形態と第2の実施の形態に示す屈折率分布レンズ型スラブ型フォトニック結晶や第3の実施の形態と第4の実施の形態に示す曲面レンズ型スラブ型フォトニック結晶は伝搬ビームが前記スラブ型フォトニック結晶の膜厚方向の境界に達することが無いので、光伝搬状態は基板の状態に依らない。従って、基板状態に関しては、図8の(b)に示すように基板部分にも空孔を有する構造や、図8の(c)に示すように基板の無い構造でもかまわない。

【0082】

次に、上記膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ型フォトニック結晶の作製方法の実施の形態について説明する。

【0083】

膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ型フォトニック結晶の作製方法は、大別して次の2通り考えられる。

【0084】

(1) 屈折率が異なる個々のフィルムの膜厚方向に2次元周期的に空孔を配列し、前記空孔位置が一致するように前記フィルムを積層方向に所望の屈折率分布となる順番に積層する。

【0085】

(2) 屈折率が異なる複数のフィルムを積層して屈折率分布を有するスラブ導波路を作製した後、膜厚方向に2次元周期的に配置する空孔を作製する。

【0086】

以下、作製方法(1)の例を第5の実施の形態に、作製方法(2)の例を第6の実施の形態に示す。

【0087】

(第5の実施の形態)

次に、第5の実施の形態について説明する。

【0088】

図9および図10に、第5の実施の形態のスラブ導波路の作成方法の概要図を示す。

【0089】

すなわち、図9および図10は、2次元周期的に空孔を配列した屈折率分布スラブ型フォトニック結晶で構成されるスラブ導波路を作成する方法を示す図である。

【0090】

本実施の形態の本屈折率分布スラブ型フォトニック結晶を応用したスラブ導波路の作製方法は、図9の(c)に示すように、所望のスラブ導波路80の膜厚方向の理想的な屈折率分布を膜厚方向にm個に分割し、前記分割したm個の部分スラブの個々の屈折率を前記部分スラブの分布する屈折率の最大値と最小値の間のある値、例えば、平均値と決め(第k番目の部分スラブの屈折率： n_k) ($k=1\sim m$)、図9の(a)に示すように前記m個の部分スラブに対応する屈折率のm個のフィルム81(第1番目のフィルム～第m番目のフィルム)を用意する。前記個々のフィルム81について、前記スラブ型フォトニック結晶80の2次元周期的に配列する空孔82位置に、突起83を有する金型84を前記フィルム81にプレスして所望の空孔85を形成した後、前記金型84を前記フィルム81から離す。この時、図9の(a)に示すように金型84を加熱した状態でプレスすると空孔

加工が容易になる。また、金型 8 4 だけでなく、フィルム 8 1 も含めて全体を加熱してもかまわない。

【0091】

次に、空孔形成済みフィルムであるフォトリソ結晶フィルムを空孔位置を揃えて積層する方法について説明する。

【0092】

まず、第 1 の方法としては、次のような方法がある。すなわち、図 9 の (b) に示すように、空孔形成済みフィルムであるフォトリソ結晶フィルム 8 6 を積層する毎にフォトリソ結晶フィルム 8 6 に垂直に、単一波長光 8 7 を照射し、積層フィルム 8 8 からの干渉光 8 9 を観測しながら、積層するフォトリソ結晶フィルム 8 6 を水平方向に移動させ、干渉光 8 9 の分布が対称になるところでフィルムを位置決めして積層する。

【0093】

次に、第 2 の方法としては、次のような方法がある。すなわち、図 10 の (b) に示すように、空孔形成済みフィルムであるフォトリソ結晶フィルム 8 6 の形成された空孔よりも細かい複数の位置決めピン 9 1 を基板 9 0 上のフィルムの空孔位置に立てた状態で、複数のフィルムを順番に積層する。

【0094】

(第 6 の実施の形態)

次に、第 6 の実施の形態について説明する。

【0095】

図 1 1 及び図 2 0 に第 6 の実施の形態のスラブ導波路の作成方法の概要図を示す。

【0096】

すなわち、図 1 1 は、2 次元周期的に空孔を配列した屈折率分布スラブ型フォトリソ結晶で構成されるスラブ導波路の第 1 の作製方法を示す概要図であり、図 2 0 は、2 次元周期的に空孔を配列した屈折率分布スラブ型フォトリソ結晶で構成されるスラブ導波路の第 2 の作製方法を示す概要図である。

【0097】

まず、図 1 1 に示すスラブ導波路の第 1 の作製方法について説明する。

【0098】

第 1 の作製方法は、図 1 1 の (a) に示すように、まず、所望のスラブ導波路 1 0 0 の膜厚方向の理想的な屈折率分布を膜厚方向に m 個に分割する。そして、前記分割した m 個の部分スラブの個々の屈折率を前記部分スラブの分布する屈折率の最大値と最小値の間のある値、例えば、平均値と決め (第 k 番目の部分スラブの屈折率: n_k) ($k = 1 \sim m$)、前記 m 個の部分スラブに対応する屈折率の m 個のフィルム 1 0 1 (第 1 番目のフィルム ~ 第 m 番目のフィルム) を用意する。そして、前記フィルム 1 0 1 を第 1 番目から第 m 番目まで順番に積層する。ただし、フィルム 1 0 1 の膜厚は、積層時にスラブの膜厚となるように、個々のフィルム 1 0 1 の膜厚と積層数を調整する。

【0099】

そして、図 1 1 の (b) に示すように、前記屈折率の異なるフィルムの積層により構成された膜厚方向に擬似 2 次屈折率分布、すなわち、実質上 2 次関数に従った屈折率分布を有する屈折率分布スラブ導波路 1 0 2 に対して、所望の 2 次元周期的に配列する空孔 1 0 6 の位置に突起 1 0 3 を有する金型 1 0 4 を前記スラブ導波路にプレスして所望の空孔 1 0 6 を形成する。その後、前記金型 1 0 4 を前記スラブ導波路から分離する。この時、金型 1 0 4 を加熱した状態でプレスすると空孔加工が容易になる。また、金型だけでなく、フィルムも含めて全体を加熱してもかまわない。

【0100】

以上スラブ導波路の第 1 の作製方法について説明した。次に、スラブ導波路の第 2 の作製方法について説明する。

【0101】

すなわち、第 2 の作製方法のうち、フィルム積層により形成された屈折率分布を有するス

ラブ導波路190を作製する方法は図11の(a)と同様である。図20のラブ導波路190の穴あけ方法として、以下の方法がある。すなわち、図20の(a)に示すように所望の位置に2次元周期的に配列した空孔を有するマスク191を重ねた状態で、図20の(b)に示すようにイオンビーム192を照射して、前記屈折率分布ラブ導波路190の前記マスクの空孔位置にトラック193を形成するイオン注入プロセス(トラッキングプロセス)を行なう。その後、図20の(c)に示すように、前記イオン照射済みの屈折率分布ラブ導波路190を強アルカリ(NaOH)195のエッチング液に浸漬するプロセス(エッチングプロセス)を行うことで前記マスク191の空孔パターンを前記屈折率分布ラブ導波路190に転写する。なお、前記ラブ導波路の空孔の大きさは前記エッチング条件(濃度、時間など)で制御する。

10

【0102】

また、前記マスク191を使用して前記ラブ導波路に空孔を形成する方法として、その他のドライエッチなどの方法も可能である。

【0103】

次に、上記膜厚方向に屈折率分布を有するラブ導波路の作製方法の実施の形態について説明する。

【0104】

膜厚方向に屈折率分布を有するラブ導波路の作製方法は、大別して次の2通りが考えられる。

20

【0105】

(1) 拡大・縮小のプロセスを使用せず実寸大で屈折率分布を形成する。

【0106】

(2) ラブ導波路の相似関係にある屈折率分布を有するラブを作製し、前記ラブを縮小・拡大することで所望の屈折率分布を有するラブ導波路を作製する。

【0107】

以下、作製方法(1)の例を第7の実施の形態～第10の実施の形態に、作製方法(2)の例を第11の実施の形態～第14の実施の形態に示す。

【0108】

(第7の実施の形態)

次に、第7の実施の形態について説明する。

30

【0109】

図12の(a)に膜厚方向に屈折率分布を有するラブ導波路の第7の実施の形態の作製方法の概要図を示す。

【0110】

本実施の形態の本屈折率分布を有するラブ導波路の作製方法は、図12の(a)に示すように、まず、所望のラブ導波路の膜厚方向の理想的な屈折率分布を膜厚方向にm個に分割し、前記分割したm個の部分スラブの個々の屈折率を前記部分スラブの分布する屈折率の最大値と最小値の間のある値、例えば、平均値と決め(第k番目の部分スラブの屈折率： n_k) ($k=1\sim m$)、前記m個の部分スラブに対応する複数の屈折率の未硬化ポリマーを用意する。次に、基板110上に第k番目の未硬化ポリマー(屈折率： n_k)を塗布し($k=1, 2, \dots, m$ の順)、ブレード113で前記第k番目の部分スラブの膜厚の第k番目のフィルムになるように未硬化ポリマーを引伸ばした後、前記未硬化ポリマー111を硬化する。上記未硬化ポリマー111の塗布・引伸ばし・硬化を第1番目のフィルムから第m番目のフィルムまで繰り返すことにより、膜厚方向に屈折率分布を有するラブ導波路を作製することができる。

40

【0111】

なお、未硬化ポリマー111の硬化方法としては、加熱やUV照射などが挙げられる。

【0112】

(第8の実施の形態)

次に、第8の実施の形態について説明する。

50

【0113】

図12の(b)に、膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第8の実施の形態の作製方法の概要図を示す。

【0114】

本実施の形態の本屈折率分布を有するスラブ導波路の作製方法は、図12の(b)に示すように、まず、所望のスラブ導波路の膜厚方向の理想的な屈折率分布を膜厚方向にm個に分割し、前記分割したm個の部分スラブの個々の屈折率を前記部分スラブの分布する屈折率の最大値と最小値の間のある値、例えば、平均値と決め(第k番目の部分スラブの屈折率： n_k) ($k=1\sim m$)、前記m個の部分スラブに対応する複数の屈折率の未硬化ポリマーを用意する。次に、基板110上に第k番目の未硬化ポリマー(屈折率： n_k)を塗布し($k=1, 2, \dots, m$ の順)、スピコート114で基板110及び第k-1番目の硬化済ポリマー上の第k番目の未硬化ポリマーに遠心力を与え、前記第k番目の未硬化ポリマーの膜厚が硬化後に前記第k番目の部分スラブの膜厚の第k番目のフィルムになるように前記第k番目の未硬化ポリマーを伸張後、前記第k番目の未硬化ポリマー111を硬化する。上記未硬化ポリマー111の塗布・伸張・硬化を第1番目のフィルムから第m番目のフィルムまで繰り返すことにより、膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路を作製することができる。

【0115】

なお、未硬化ポリマー111の硬化方法としては、加熱やUV照射などが挙げられる。

【0116】

(第9の実施の形態)

次に、第9の実施の形態について説明する。

【0117】

図12の(c)に膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第9実施の形態の作製方法の概要図を示す。

【0118】

本実施の形態の本屈折率分布を有するスラブ導波路の作製方法は、図12(c)に示すように、まず、所望のスラブ導波路の膜厚方向の理想的な屈折率分布を膜厚方向にm個に分割し、前記分割したm個の部分スラブの個々の屈折率を前記部分スラブの分布する屈折率の最大値と最小値の間のある値、例えば、平均値と決め(第k番目の部分スラブの屈折率： n_k) ($k=1\sim m$)、前記m個の部分スラブに対応する複数の屈折率を有する光学的に透明な材料115を用意する。次に、基板110上に第k番目の材料(屈折率： n_k)をスパッタなどで前記第k番目の材料の膜厚が前記第k番目の部分スラブの膜厚になるように堆積・積層する($k=1, 2, \dots, m$ の順)。上記材料の115の薄膜堆積プロセスを第1番目の堆積薄膜から第m番目の堆積薄膜まで繰り返すことにより、膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路を作製することができる。

【0119】

なお、前記光学的に透明な材料115としては、ポリマー、ガラス、化合物半導体、酸化物(セラミック)など、屈折率制御が可能な材料が挙げられる。

【0120】

(第10の実施の形態)

次に、第10の実施の形態について説明する。

【0121】

図12の(d)に膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第10実施の形態の作製方法の概要図を示す。

【0122】

本屈折率分布を有するスラブ導波路の作製方法の実施例は、図12(d)に示すように、まず、所望の屈折率分布の最大の屈折率を均質に有する屈折率均質スラブ117を用意し、前記屈折率均質スラブ導波路の屈折率を下げるイオン119を有する電離媒体(電解液)118に前記屈折率均質スラブ117を浸漬する。前記電離媒体(電解液)118内の

イオン 1 1 9 は前記屈折率均質スラブ 1 1 7 の表面から進入し、前記屈折率均質スラブ 1 1 7 内のイオンを置換する。そのイオン置換量は、前記屈折率均質スラブ 1 1 7 の表面から内側に向かって少なくなるので、屈折率が均質であった前記屈折率均質スラブ 1 1 7 の屈折率は、中央で屈折率が最大となる屈折率分布を有するスラブ導波路となる。なお、前記屈折率分布は、イオン交換条件（濃度、温度、時間など）制御する。

【0 1 2 3】

前記屈折率均質スラブ 1 1 7 としてはガラスなどを、屈折率を下げるイオン 1 1 9 としてはフッ素イオンなどが挙げられる。

【0 1 2 4】

なお、本実施の形態の屈折率均質スラブ 1 1 7 は本発明のフィルム状スラブ素材の例である。

【0 1 2 5】

（第 1 1 の実施の形態）

次に、第 1 1 の実施の形態について説明する。

【0 1 2 6】

図 1 3 に膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第 1 1 実施の実施の形態の作製方法の概要図を示す。

【0 1 2 7】

本実施の形態の本屈折率分布を有するスラブ導波路の作製方法は、図 1 3 に示すように、所望のスラブ導波路 1 2 0 の膜厚方向の理想的な屈折率分布を膜厚方向に m 個に分割し、前記分割した m 個の部分スラブの個々の屈折率を前記部分スラブの分布する屈折率の最大値と最小値の間のある値、例えば、平均値と決め（第 k 番目の部分スラブの屈折率： n_k ）（ $k = 1 \sim m$ ）、前記 m 個の部分スラブに対応する屈折率の m 個の厚膜フィルム 1 2 1（第 1 番目の厚膜フィルム～第 m 番目の厚膜フィルム）を用意する。平面を有する台 1 2 2 の平面 1 2 4 上に前記厚膜フィルムを第 1 番目から第 m 番目まで順番に積層し、前記台の平面 1 2 4 と前記平面 1 2 4 と互いに平行な平面 1 2 5 を有する加圧部 1 2 3 の前記平面 1 2 5 の間に前記積層した圧膜フィルム挟み、前記積層した圧膜フィルムの膜厚が所望のスラブ導波路 1 2 0 の膜厚になるまで加重を加える。このとき、前記積層した厚膜フィルムを加熱すると加工が容易になる。

【0 1 2 8】

このように、所望の屈折率分布を有するスラブ導波路に相似関係にある屈折率分布を有するスラブを圧縮することにより、 μm オーダーの光学材料の作製も容易になる。

【0 1 2 9】

（第 1 2 の実施の形態）

次に、第 1 2 の実施の形態について説明する。

【0 1 3 0】

図 1 4 に、膜厚方向に屈折率分布を有すると同時に、ある一定方向に膜厚が変化し、前記屈折率分布が前記分布する膜厚に比例して変化するスラブ導波路の第 1 2 の実施の形態の作製方法の概要図を示す。

【0 1 3 1】

本実施の形態の本屈折率分布を有するスラブ導波路の作製方法は、図 1 4 に示すように、膜厚方向に屈折率分布を有すると同時に、ある一定方向に膜厚が変化し、前記屈折率分布が前記分布する膜厚に比例して変化するスラブ導波路 1 3 0 の膜厚方向の理想的な屈折率分布を膜厚方向に m 個に分割し、前記分割した m 個の部分スラブの個々の屈折率を前記部分スラブの分布する屈折率の最大値と最小値の間のある値、例えば、平均値と決め（第 k 番目の部分スラブの屈折率： n_k ）（ $k = 1 \sim m$ ）、前記 m 個の部分スラブに対応する屈折率の m 個の厚膜フィルム 1 3 1（第 1 番目の厚膜フィルム～第 m 番目の厚膜フィルム）を用意する。平面を有する台 1 3 2 の平面 1 3 4 上に前記厚膜フィルムを第 1 番目から第 m 番目まで順番に積層し、前記台の平面 1 3 4 と前記平面 1 3 4 との距離が前記スラブ導波路 1 3 0 の膜厚変化に応じて単調変化する面 1 3 5 を有する加圧部 1 3 3 の前記面 1 3

5の間に前記積層した圧膜フィルム挟み、前記積層した圧膜フィルムの膜厚が所望のスラブ導波路130の膜厚になるまで加重を加える。このとき、前記積層した厚膜フィルムを加熱すると加工が容易になる。

【0132】

このように、所望の屈折率分布を有するスラブ導波路に相似関係にある屈折率分布を有するスラブを圧縮することにより、 μm オーダーの光学材料の作製も容易になる。

【0133】

図14の膜厚方向に屈折率分布を有すると同時に、ある一定方向に膜厚が変化し、前記屈折率分布が前記分布する膜厚に比例して変化するスラブ導波路は、膜厚の大きい端136と膜厚の小さな端137のモードフィールドが異なるため、モード変換器として利用できる。さらに、前記スラブ導波路130の膜厚方向と前記膜厚の大きい端136と膜厚の小さな端137を結ぶ光軸に垂直な方向の幅138をシングルモード条件を満足する大きさにすると、前記モード変換機はシングルモードのモード変換器として利用できる。

【0134】

(第13の実施の形態)

次に、第13の実施の形態について説明する。

【0135】

図15に膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第13実施の形態の作製方法の概要図を示す。

【0136】

本実施の形態の本屈折率分布を有するスラブ導波路の作製方法は、図15に示すように、所望のスラブ導波路140の膜厚方向の理想的な屈折率分布を膜厚方向に m 個に分割し、前記分割した m 個の部分スラブの個々の屈折率を前記部分スラブの分布する屈折率の最大値と最小値の間のある値、例えば、平均値と決め(第 k 番目の部分スラブの屈折率: n_k)($k=1\sim m$)、前記 m 個の部分スラブに対応する屈折率の m 個の厚膜フィルム141(第1番目の厚膜フィルム～第 m 番目の厚膜フィルム)を用意する。次に、スラブ導波路140の膜厚と同じ間隔を有し、互いに反対方向に回転する対抗する2個のローラー(142、143)間に前記ローラーの回転方向に向かって前記厚膜フィルムを第1番目から第 m 番目まで順番に積層した積層厚膜フィルムを挿入する。挿入した積層厚膜フィルムは、前記2個のローラー(142、143)によりスラブ導波路140の膜厚まで圧延される。このとき、前記積層した厚膜フィルムを加熱すると加工が容易になる。

【0137】

また、図は省略するが、平面上に積層厚膜フィルム上でローラーで加重しながら転がすことにより、前記積層厚膜フィルムを引伸ばす(圧延する)ことも可能である。

【0138】

なお、前記圧延プロセスを複数回に分け、段階的に前記積層厚膜フィルムを薄くしても良い。

【0139】

このように、所望の屈折率分布を有するスラブ導波路に相似関係にある屈折率分布を有するスラブを圧縮することにより、 μm オーダーの光学材料の作製も容易になる。

【0140】

(第14の実施の形態)

次に、第14の実施の形態について説明する。

【0141】

図16に膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第14実施の形態の作製方法の概要図を示す。

【0142】

本屈折率分布を有するスラブ導波路の作製方法の実施例は、図16に示すように、所望のスラブ導波路150の膜厚方向の理想的な屈折率分布を膜厚方向に m 個に分割し、前記分割した m 個の部分スラブの個々の屈折率を前記部分スラブの分布する屈折率の最大値と最

小値の間のある値、例えば、平均値と決め（第 k 番目の部分スラブの屈折率： n_k ）（ $k = 1 \sim m$ ）、前記 m 個の部分スラブに対応する屈折率の m 個の厚膜フィルム 151（第1番目の厚膜フィルム～第 m 番目の厚膜フィルム）を用意する。次に、前記厚膜積層フィルム 151の対抗する端を治具（152、153）で保持し、前記治具（152、153）を相対的に遠ざけて、前記厚膜積層フィルム 151に対して面に平行に外側へ張力を加えることにより、前記厚膜積層フィルム 151の膜厚をスラブ導波路 150の膜厚まで薄くする。このとき、前記積層した厚膜フィルム 150を加熱すると加工が容易になる。なお、前記引張りプロセスを複数回に分け、段階的に前記積層厚膜フィルムを薄くしても良い。

【0143】

このように、所望の屈折率分布を有するスラブ導波路に相似関係にある屈折率分布を有するスラブを圧縮することにより、 μm オーダーの光学材料の作製も容易になる。

【0144】

（第15の実施の形態）

次に、第15の実施の形態について説明する。

【0145】

図18に膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第15実施の形態の概要図を示す。

【0146】

膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第15実施の形態は、図18に示すように、膜厚方向の中央近傍の最大屈折率部分と、前記最大屈折率部分から離れるに従って屈折率が2次曲線に沿って低下する屈折率低下部分で構成される屈折率分布スラブ導波路 170と、前記屈折率分布スラブ導波路 170内において入射光を拡散する拡散面 171で構成される。本実施例は、前記屈折率分布スラブ導波路 170に対する入射光 174と出射光 175の結合方法で、主に図18（a）、（b）、（c）の3種類に分類される。

【0147】

（1）直線型マルチキャスト

図18の（a）に示すように、光の入射面 172と出射面 173が前記屈折率分布スラブ導波路 170の膜厚方向に対して平行で、前記入射光拡散面 171も前記膜厚方向に平行である。

【0148】

この場合、入射光 174は、屈折率分布スラブ導波路 170に平行に入射し、前記拡散面 171において前記屈折率分布スラブ導波路 170の膜厚方向に対して垂直方向に光が一樣に拡散し、出射面のいずれの位置からもほぼ等量の光量の出射光 175を受けることができる。

【0149】

（2）反射型マルチキャスト

図18の（b）に示すように、光の入射面と出射面が前記屈折率分布スラブ導波路 170の膜厚方向に対して互いに反対方向に 45° 傾いた傾斜入射面 177と傾斜出射面 178となり、前記入射光拡散面 171も、傾斜入射面 177同様 45° 傾いている。

【0150】

この場合、入射光 174は、屈折率分布スラブ導波路 170の膜厚方向に入射して 45° 傾いた傾斜入射面 177で反射して前記屈折率分布スラブ導波路 170に結合される。前記傾斜入射面 177上の拡散面 171によって入射光は、前記屈折率分布スラブ導波路 170の膜厚方向に対して垂直方向に光が一樣に拡散し、前記傾斜出射面 178での反射により、屈折率分布スラブ導波路 170の膜厚方向のいずれの位置からもほぼ等量の光量の出射光 175を受けることができる。

【0151】

（3）カプラー型マルチキャスト

図18の（c）に示すように、前記屈折率分布スラブ導波路 170の膜厚方向に平行な入

10

20

30

40

50

射面と出射面のそれぞれの近傍にプリズムカップラー 179 を設け、前記拡散面は、入射面同様膜厚方向である。

【0152】

この場合、入射光 174 は、屈折率分布スラブ導波路 170 の膜厚方向に傾けてプリズムカップラー 179 へ入射し、前記屈折率分布スラブ導波路 170 に結合される。前記入射面上の拡散面によって入射光は、前記屈折率分布スラブ導波路 170 の膜厚方向に対して垂直方向に光が一樣に拡散し、前記屈折率分布スラブ導波路 170 を結合した一方のプリズムカップラー 179 を介して出射面のいずれの位置からもほぼ等量の光量の出射光 175 を受けることができる。

【0153】

ここで、図示していないが、前記出射面に複数の受光部を設けると、1 個の光入力信号を複数の受光信号に分配することができる。

【0154】

また、前記屈折率分布スラブ導波路 170 の 2 次曲線に沿った屈折率低下部分により、中心から離れるに従って屈折率が低下するので中心から離れる位置を通る高次モードほど速度が速く、中心に近い屈折率が高い位置を通る低次モードほど速度が遅いので、前記低次モードから高次モードの渡って等速伝搬（モード無分散）、すなわちシングルモードと同様の伝搬が可能となり、屈折率が一樣なスラブ導波路に比べて光高速通信が可能となる。

【0155】

上記のような、拡散面を有する入射面と対応する出射面は、同一の前記屈折率分布スラブ導波路 170 において複数存在しても良く、入射光と前記屈折率分布スラブ導波路 170 の結合方法も混在しても問題ない。

【0156】

（第 16 の実施の形態）

次に、第 16 の実施の形態について説明する。

【0157】

図 19 の（a）に膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第 16 実施の形態の概要図を示す。

【0158】

本実施の形態の膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路は、図 19 の（a）に示すように、膜厚方向の中央近傍の最大屈折率部分と、前記最大屈折率部分から離れるに従って屈折率が 2 次曲線に沿って低下する屈折率低下部分で構成される屈折率分布スラブ導波路 170 と、前記屈折率分布スラブ導波路 170 内において入射光を拡散する拡散面 171 で構成される屈折率分布スラブ導波路を、前記拡散面を同方向に揃えた状態で、膜厚方向に積層した構成を有する。

【0159】

このように、前記屈折率分布スラブ導波路 170 を多層化した多層屈折率分布スラブ導波路 184 を使用すると、複数の入射光を束ねた入射部（図示せず）と前記多層屈折率分布スラブ導波路 184 のパッシブアラインメント（固定部を使用した機械精度での光結合）が一度に可能となる。また、出力側についても同様に複数の受光部を束ねた受光部（図示せず）と前記多層屈折率分布スラブ導波路 184 のパッシブアラインメントが可能となる。

【0160】

（第 17 の実施の形態）

次に、第 17 の実施の形態について説明する。

【0161】

図 19 の（b）に膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路の第 17 実施の形態の概要図を示す。

【0162】

本実施の形態の膜厚方向に屈折率分布を有するスラブ導波路は、図 19 の（b）に示すよ

10

20

30

40

50

うに、本願第15の実施の形態の(2)反射型マルチキャストの屈折率分布スラブ導波路と、プリント基板などの電気用絶縁基板180を積層した構成を有し、前記電気用絶縁基板180において前記屈折率分布スラブ導波路170の膜厚方向の入射光182と出射光183が通る部分にスルーホール181を設けることにより入射光182と出射光183と前記屈折率分布スラブ導波路の結合を可能にする。

【0163】

このように、前記屈折率分布スラブ導波路170と電気用絶縁基板180を多層化したハイブリッド導波路を使用すると、電気回路と光回路の実装が容易になると同時に、小型化も可能となる。

【0164】

なお、前記プリント基板などの電気用絶縁基板180としては、3次元電気実装などの多層プリント基板などでも良い。

【0165】

なお、本願明細書に開示された各発明の相互の関係は、以下の通りである。

【0166】

第1の発明は、スラブ中に前記スラブの屈折率とは異なる屈折率を有する柱状物質を前記スラブ面に沿って2次元周期的に配列した2次元結晶格子を備え、前記スラブ中の前記柱状物質部分以外のスラブ屈折率部分の屈折率と、前記柱状物質の個数及び形状及び屈折率とが、入射されてきた光束が最も広がる際の、前記スラブ厚さ方向の前記光束の大きさが、前記スラブ厚さを越えないように構成されているスラブ導波路である。

【0167】

また、第2の発明は、前記スラブ屈折率部分は、屈折率の分布が一様でない第1の発明のスラブ導波路である。

【0168】

また、第3の発明は、前記スラブ屈折率部分の前記スラブ面と直交する方向の屈折率は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定部分において最大であり、前記所定部分からの距離の2次関数に従って低下する第2の発明のスラブ導波路である。

【0169】

また、第4の発明は、前記スラブ屈折率部分の前記スラブ面と直交する方向の屈折率は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定の長さの領域において実質上一定であり、前記所定の長さの領域の端部からの距離の2次関数に従って低下する第2の発明のスラブ導波路である。

【0170】

また、第5の発明は、前記距離の2次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定数は、 1 mm^{-1} 以上である第3または4の発明のスラブ導波路である。

【0171】

また、第6の発明は、前記柱状物質は、屈折率が一様な気体である第3または4の発明のスラブ導波路である。

【0172】

また、第7の発明は、前記距離の2次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定数は、全光路長が光学的に0.5の整数倍のピッチとなるような屈折率分布定数である第3または4の発明のスラブ導波路である。

【0173】

また、第8の発明は、前記距離の2次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定数は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離との和が、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質とで構成される構成単位の長さと同しくなるような屈折率分布定数である第3または4の発明のスラブ導波路である。

【0174】

また、第9の発明は、前記距離の2次関数に従って低下する部分の屈折率の屈折率分布定

10

20

30

40

50

数は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離とが等しくなるような屈折率分布定数である第8の発明のスラブ導波路である。

【0175】

また、第10の発明は、複数の前記スラブ屈折率部分のうち、光の入力端面となる前記スラブ屈折率部分の入力端面、及び光の出力端面となる前記スラブ屈折率部分の出力端面の少なくとも一方の端面は曲面を有する第3または4の発明のスラブ導波路である。

【0176】

また、第11の発明は、複数の前記スラブ屈折率部分のうち、光の入力端面となる前記スラブ屈折率部分の入力端面、及び光の出力端面となる前記スラブ屈折率部分の出力端面の少なくとも一方の端面は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定の面が平面であり、前記平面の外側に曲面を有する第3または4の発明のスラブ導波路である。

【0177】

また、第12の発明は、前記曲面は、 $0.1\mu\text{m}$ 以上の曲率半径を有する曲面である第10または11の発明のスラブ導波路である。

【0178】

また、第13の発明は、前記曲面は、前記スラブ屈折率部分及び前記柱状物質から構成される構成単位を1周期とした場合の総周期数の $1/10$ 倍 μm 以上の曲率半径を有する曲面である第10または11の発明のスラブ導波路である。

【0179】

また、第14の発明は、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質との境界面のうち、少なくとも1つの境界面は曲面を有している第1の発明のスラブ導波路である。

【0180】

また、第15の発明は、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質との境界面は、前記スラブの膜厚方向に曲面を有する第14の発明のスラブ導波路である。

【0181】

また、第16の発明は、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質との境界面は、前記スラブ屈折率部分の端部以外の所定の長さの領域で平面を有し、前記所定の長さの領域の外側で前記スラブの膜厚方向に曲面を有する第14の発明のスラブ導波路である。

【0182】

また、第17の発明は、前記曲面の曲率半径は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離との和が、前記スラブ屈折率部分と前記柱状物質とで構成される構成単位の長さで等しくなるような曲率半径である第15または16の発明のスラブ導波路である。

【0183】

また、第18の発明は、前記曲面の曲率半径は、前記スラブ屈折率部分の入射側焦点距離と出射側焦点距離とが等しくなるような曲率半径である第17の発明のスラブ導波路である。

【0184】

また、第19の発明は、前記曲面の曲率半径は、 $0.1\mu\text{m}$ 以上である第15または16の発明のスラブ導波路である。

【0185】

また、第20の発明は、前記スラブ面の少なくとも一方に前記スラブ面と接する膜状物質を備えた第1～19の発明のいずれかのスラブ導波路である。

【0186】

また、第21の発明は、入射光の入射面に少なくとも一つの入射光拡散部分を備えた第3、4、15、16の発明のいずれかのスラブ導波路である。

【0187】

また、第22の発明は、前記入射光拡散部分は、前記入射光が最初に反射する面に設けられている第21の発明のスラブ導波路である。

【0188】

また、第 23 の発明は、第 21 の発明のスラブ導波路を、複数個膜圧方向に積層したスラブ導波路である。

【0189】

また、第 24 の発明は、電気用基板と、前記電気用基板にその膜圧方向に積層された第 21 の発明のスラブ導波路とを備えたスラブ導波路である。

【0190】

また、第 25 の発明は、前記電気用基板に入射光と出射光との少なくとも一つを通過させるスルーホールが形成されている第 24 の発明のスラブ導波路である。

【0191】

また、第 26 の発明は、屈折率が異なり孔のあいた複数のフィルムを前記孔の位置をあわせながら積層して積層体を形成する積層工程を備え、前記積層体のフィルム部分はスラブとして機能するものであり、前記孔の部分は柱状物質として機能するものであるスラブ導波路の製造方法である。

【0192】

また、第 27 の発明は、前記複数のフィルムのうち、最も屈折率が高いフィルムが前記積層体の端部以外の位置に位置し、その最も高い屈折率のフィルムから離れるに従って、順番に低い屈折率のフィルムが前記積層体として積層される第 26 の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0193】

また、第 28 の発明は、前記積層工程は、前記複数のフィルムのうちのフィルムを前記積層体に積層する際にその積層するフィルムのフィルム面と垂直に単一波長光を照射し、前記積層体からの干渉光に基づいてその積層するフィルムを位置決めすることによって前記孔の位置を膜厚方向に揃える第 26 の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0194】

また、第 29 の発明は、前記積層工程は、前記孔よりも細い複数の位置決めピンを前記フィルムの孔の位置に立て、その位置決めピンを利用して前記複数のフィルムの前記孔の位置を膜圧方向にそろえて積層する第 26 の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0195】

また、第 30 の発明は、前記孔は、予め前記フィルムに、周期的に配列した柱状突起を表面に有する金型を押し付け、その押し付けた金型を離型させることによって形成されたものである第 26 の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0196】

また、第 31 の発明は、屈折率が異なる複数のフィルムを積層して積層体を形成する積層工程と、その形成された積層体に孔を形成する柱状物質形成工程とを備え、前記積層体のフィルム部分はスラブとして機能するものであり、前記孔の部分は柱状物質として機能するものであるスラブ導波路の製造方法である。

【0197】

また、第 32 の発明は、前記柱状物質形成工程は、前記積層体に、周期的に配列した柱状突起を表面に有する金型を押し付け、その押し付けた金型を離型させることによって前記孔を形成する第 31 の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0198】

また、第 33 の発明は、前記柱状物質形成工程は、周期的に配列した孔を有するマスクを前記積層体のフィルム面に重ねた状態でイオンを注入するトラッキング工程と、そのイオン注入済みの前記積層体をエッチング液に浸漬するエッチング工程とを有する第 31 の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0199】

また、第 34 の発明は、前記積層工程は、未硬化ポリマー塗布する工程と、前記未硬化ポリマーを引伸ばす工程と、その引き延ばされた前記未硬化ポリマーを硬化する工程との 3

10

20

30

40

50

工程の繰り返しで行われる第31の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0200】

また、第35の発明は、前記積層工程は、積層材料の薄膜堆積工程の繰り返しで行われる第31の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0201】

また、第36の発明は、前記積層工程は、その端部以外の部分で最高屈折率となる屈折率分布となるように、屈折率の異なる厚膜フィルムを積層して屈折率分布型厚膜積層体を形成する厚膜積層体形成工程と、

前記屈折率分布型厚膜積層体の膜厚が所望の膜厚となるまで前記屈折率分布型厚膜積層体を積層方向にプレスするプレス工程とを有する第31の発明のスラブ導波路の製造方法である。 10

【0202】

また、第37の発明は、前記プレス工程は、互いに平行な面を有する2物体で前記屈折率分布型厚膜積層体を挟みこんで加重する第36の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0203】

また、第38の発明は、前記プレス工程は、少なくとも部分的に互いに非平行な面を有する2物体で前記屈折率分布型厚膜積層体を挟み込んで加重する第36の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0204】

また、第39の発明は、前記2物体は、水平な平面を有する第1の物体と、前記第1の物体の平面に平行な一方向に対して前記平面からの距離が単調変化する平面あるいは曲面を有する第2の物体である第38の発明のスラブ導波路の製造方法である。 20

【0205】

また、第40の発明は、前記プレス工程は、最小間隔が実質上スラブ導波路の膜厚に等しく、前記間隔位置で互いに平行な面を有する少なくとも一方がローラーである2物体の前記ローラーの回転力により前記2物体間に前記屈折率分布型厚膜積層体を巻き込みながら前記屈折率分布型厚膜積層体の膜厚をスラブ導波路の膜厚まで薄くする第36の発明のスラブ導波路の製造方法である。

【0206】

また、第41の発明は、前記プレス工程は、最小間隔が実質上スラブ導波路の膜厚に等しく、前記間隔位置で互いに平行な面を有する少なくとも一方がローラーである2物体の一方の表面に、前記屈折率分布型厚膜積層体を固定した状態で、前記ローラーを前記屈折率分布型厚膜積層体上で転がすことにより、前記屈折率分布型厚膜積層体の膜厚をスラブ導波路の膜厚まで薄くする第36の発明のスラブ導波路の製造方法である。 30

【0207】

また、第42の発明は、前記プレス工程は、前記屈折率分布型厚膜積層体の端の少なくとも2ヵ所に前記屈折率分布型厚膜積層体に平行に外側に向かう張力を加えることにより、前記屈折率分布型厚膜積層体の膜厚をスラブ導波路の膜厚まで薄くする第36の発明のスラブ導波路の製造方法である。 40

【0208】

また、第43の発明は、前記プレス工程の際、前記屈折率分布型厚膜積層体を加熱する第26～42の発明のいずれかのスラブ導波路の製造方法である。

【0209】

第44の発明は、フィルム状スラブ素材に対して、上下面を通して前記フィルム状スラブ素材の内外へイオンを移動させることで屈折率分布を形成する屈折率分布形成工程と、その屈折率分布が形成された前記フィルム状スラブ素材に孔をあける柱状物質形成工程とを備え、

前記フィルム状スラブ素材の部分はスラブとして機能するものであり、
前記孔の部分は柱状物質として機能するものであるスラブ導波路の製造方法である。

【0210】

【発明の効果】

以上説明したところから明らかなように、本発明は、光ファイバーと結合ロスが無く、シングルモード条件を満足することが出来るスラブ導波路、及びスラブ導波路の製造方法を提供することが出来る。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の第 1 の実施の形態におけるスラブ導波路の構成概要断面図である。

【図 2】 本発明の第 1 の実施の形態におけるスラブ導波路の斜視図である。

【図 3】 本発明の第 1 実施の形態におけるスラブ導波路の屈折率分布定数とフォトニック結晶の総周期数の関係図である。

【図 4】 本発明の第 2 実施の形態におけるスラブ導波路の構成概要断面図である。

10

【図 5】 本発明の第 3 実施の形態におけるスラブ導波路の構成概要断面図である。

【図 6】 本発明の第 3 実施の形態におけるスラブ導波路の曲率半径とフォトニック結晶の総周期数の関係図である。

【図 7】 本発明の第 4 実施の形態におけるスラブ導波路の構成概要断面図である。

【図 8】 本発明の第 1 ～ 第 4 実施の形態におけるスラブ導波路の基板の構成概要図である。

【図 9】 本発明の第 5 実施の形態におけるスラブ導波路の第 1 作製方法の概要図である。

【図 10】 本発明の第 5 実施の形態におけるスラブ導波路の第 2 作製方法の概要図である。

【図 11】 本発明の第 6 実施の形態におけるスラブ導波路の第 1 作製方法の概要図である。

20

【図 12】 本発明の第 7 ～ 第 10 実施の形態におけるスラブ導波路の作製方法の概要図である。

【図 13】 本発明の第 11 実施の形態におけるスラブ導波路の作製方法の概要図である。

【図 14】 本発明の第 12 実施の形態におけるスラブ導波路の作製方法の概要図である。

【図 15】 本発明の第 13 実施の形態におけるスラブ導波路の作製方法の概要図である。

【図 16】 本発明の第 14 実施の形態におけるスラブ導波路の作製方法の概要図である。

【図 17】 本発明の第 1 ～ 第 4 実施の形態におけるスラブ導波路の膜厚方向の屈折率分布と端面加工の構成概要図である。

30

【図 18】 本発明の第 15 実施の形態におけるスラブ導波路の概要図である。

【図 19】 本発明の第 16 実施の形態におけるスラブ導波路の概要図である。

【図 20】 本発明の第 6 実施の形態におけるスラブ導波路の第 2 作製方法（トラックエッチ）の概要図である。

【図 21】 従来のスラブ型フォトニック結晶で構成されたスラブ導波路の例である。

【符号の説明】

1 屈折率分布スラブ

2 空孔

3 基板

4 ビーム軌跡

40

5 入力側ビームウェスト

6 入力側ビームウェスト

7 屈折率分布スラブ型フォトニック結晶

3 1 ビーム軌跡

3 2 屈折率分布スラブ部分の一周期分の入射側ビームウェスト

3 3 屈折率分布スラブ部分の一周期分の出力側ビームウェスト

3 4 スラブ型フォトニック結晶の入射側ビームウェスト

3 5 スラブ型フォトニック結晶の出射側ビームウェスト

4 1 スラブ屈折率部分

4 2 空孔

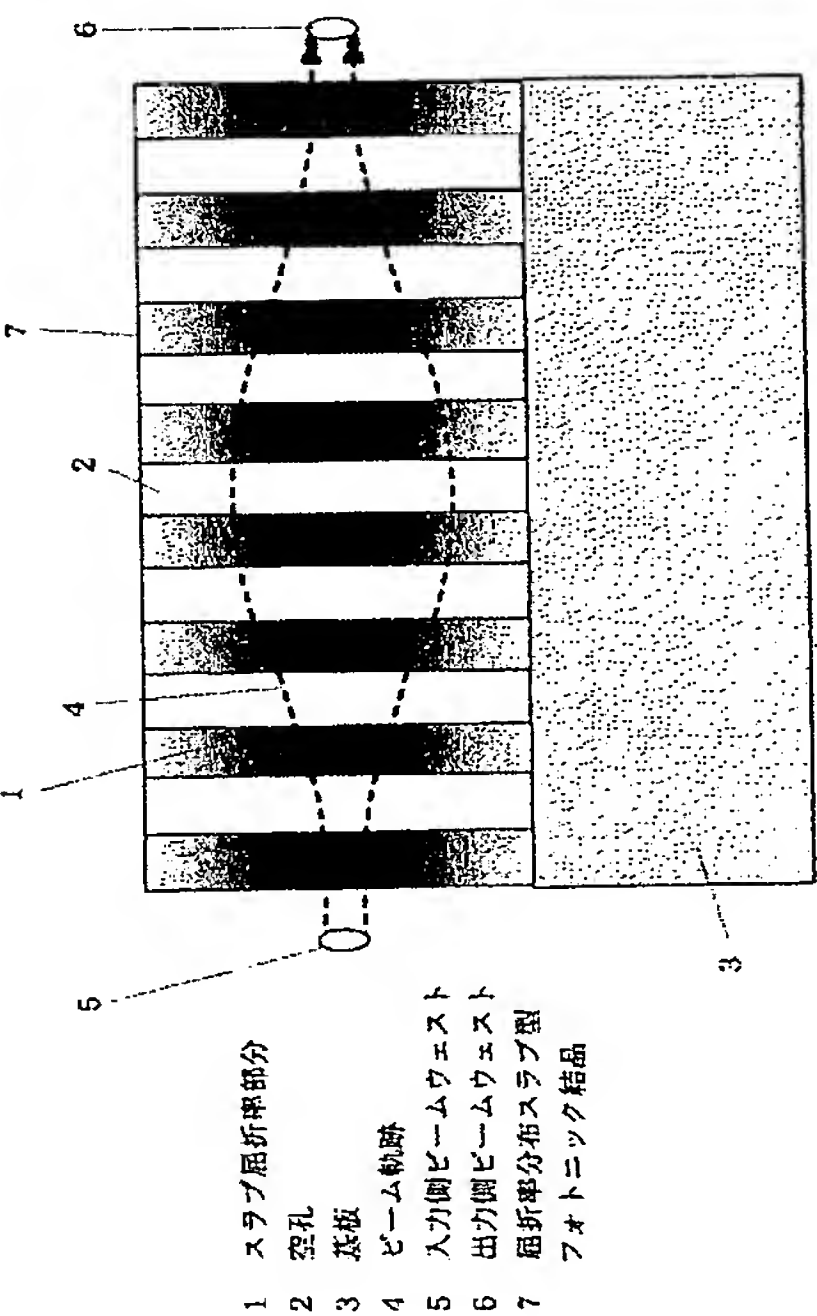
50

4 3	基板	
4 4	ビーム軌跡	
4 5	スラブ型フォトニック結晶の入射端面	
4 6	スラブ型フォトニック結晶の出射端面	
4 7	スラブ型フォトニック結晶	
4 8	ビームウェスト	
6 1	スラブ屈折率部分	
6 2	空孔	
6 3	スラブ部分一周期分の入射側ビームウェスト	
6 4	スラブ部分一周期分の出射側ビームウェスト	10
6 5	スラブ型フォトニック結晶の入射側ビームウェスト	
6 6	スラブ型フォトニック結晶の出射側ビームウェスト	
6 7	スラブ型フォトニック結晶	
6 8	ビーム軌跡	
7 0	スラブ型フォトニック結晶	
7 1	基板	
7 2	スラブ屈折率部分	
7 3	空孔	
7 4	空孔付基板	
7 5	屈折率分布	20
8 0	屈折率分布スラブ型フォトニック結晶	
8 1	フィルム	
8 2	空孔	
8 3	突起	
8 4	金型	
8 5	ヒーター	
8 6	フォトニック結晶フィルム	
8 7	単一波長ビーム	
8 8	積層済フォトニック結晶フィルム	
8 9	干渉光	30
9 0	基板	
9 1	位置決めピン	
1 0 0	屈折率分布スラブ型フォトニック結晶	
1 0 1	フィルム	
1 0 2	屈折率分布スラブ	
1 0 3	突起	
1 0 4	金型	
1 0 5	ヒーター	
1 0 6	空孔	
1 1 0	基板	40
1 1 1	硬化前ポリマー	
1 1 2	積層済フィルム	
1 1 3	ブレード	
1 1 4	スピンコーター	
1 1 5	堆積材料	
1 1 6	原料ソース	
1 1 7	屈折率均質スラブ	
1 1 8	電離媒体（電解液）	
1 1 9	イオン	
1 2 0	屈折率分布スラブ導波路	50

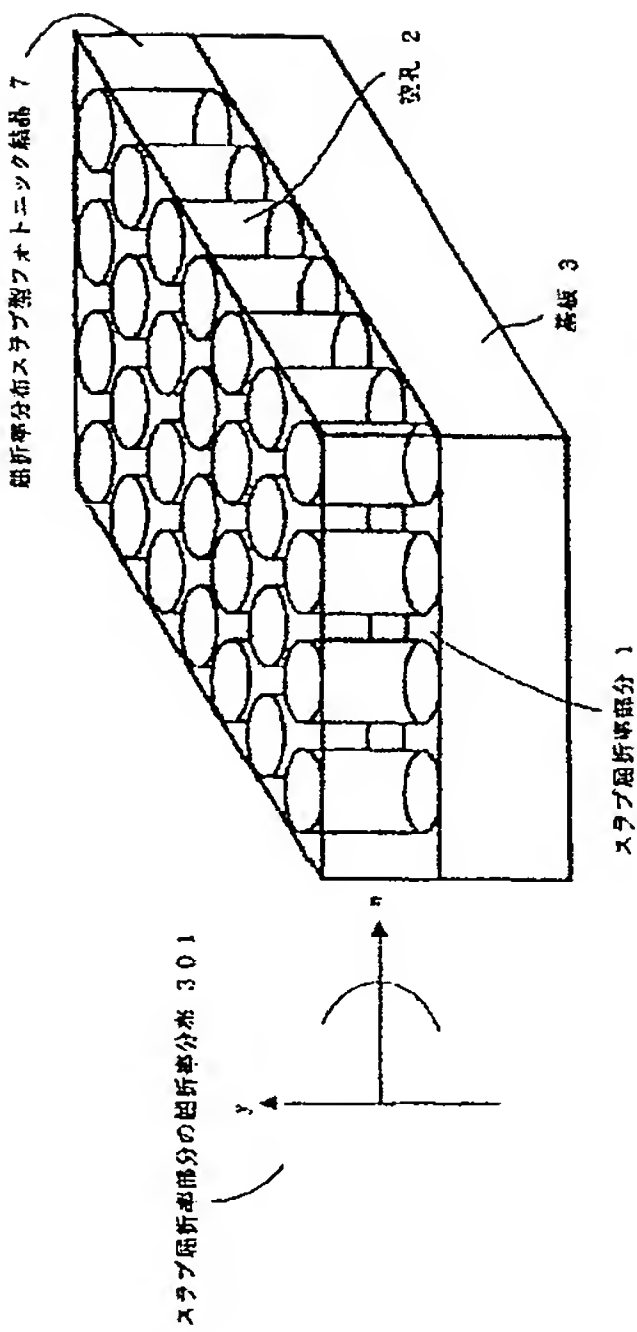
1 2 1	厚膜フィルム	
1 2 2	台	
1 2 3	加圧部	
1 2 4	台平面	
1 2 5	加圧部平面	
1 3 0	テーパ型屈折率分布スラブ導波路	
1 3 1	積層厚膜フィルム	
1 3 2	台	
1 3 3	テーパ付加圧部	10
1 3 4	台平面	
1 3 5	加圧部テーパ面	
1 3 6	スラブ導波路端 (膜厚大)	
1 3 7	スラブ導波路端 (膜厚大)	
1 3 8	スラブ導波路幅	
1 3 9	スラブ導波路高	
1 4 0	屈折率分布スラブ導波路	
1 4 1	積層厚膜フィルム	
1 4 2	第1のローラー	
1 4 3	第2のローラー	20
1 5 0	屈折率分布スラブ導波路	
1 5 1	積層厚膜フィルム	
1 5 2	第1の固定治具	
1 5 3	第2の固定治具	
1 6 0	2次曲線屈折率分布型スラブ	
1 6 1	2次曲線	
1 6 2	ハイブリッド屈折率分布型スラブ	
1 6 3	2次曲線部分	
1 6 4	一定部分	
1 6 5	2次曲面	30
1 6 6	非2次曲面	
1 6 7	曲面	
1 6 8	非曲面	
1 6 9	回折表面	
2 0 0	スラブ型フォトニック結晶	
1 7 0	屈折率分布型スラブ導波路	
1 7 1	拡散面	
1 7 2	入射面	
1 7 3	出射面	
1 7 4	入射光	40
1 7 5	出射光	
1 7 6	拡散光	
1 7 7	傾斜入射面 (45°)	
1 7 8	傾斜出射面 (45°)	
1 7 9	プリズムカプラー	
1 8 0	電気用基板 (多層)	
1 8 1	スルーホール	
1 8 2	入射光	
1 8 3	出射光	
1 8 4	多層屈折率分布型スラブ導波路	50
1 9 0	屈折率分布スラブ	

- 1 9 1 マスク
- 1 9 2 イオンビーム
- 1 9 3 トラック
- 1 9 4 フォトニック結晶スラブ
- 1 9 5 強アルカリ (NaOH)
- 1 9 6 侵食孔
- 2 0 1 基板
- 2 0 2 空孔
- 2 0 3 スラブ
- 2 0 4 入射光
- 2 0 5 出射光
- 2 0 6 拡散光
- 2 0 7 基板空孔

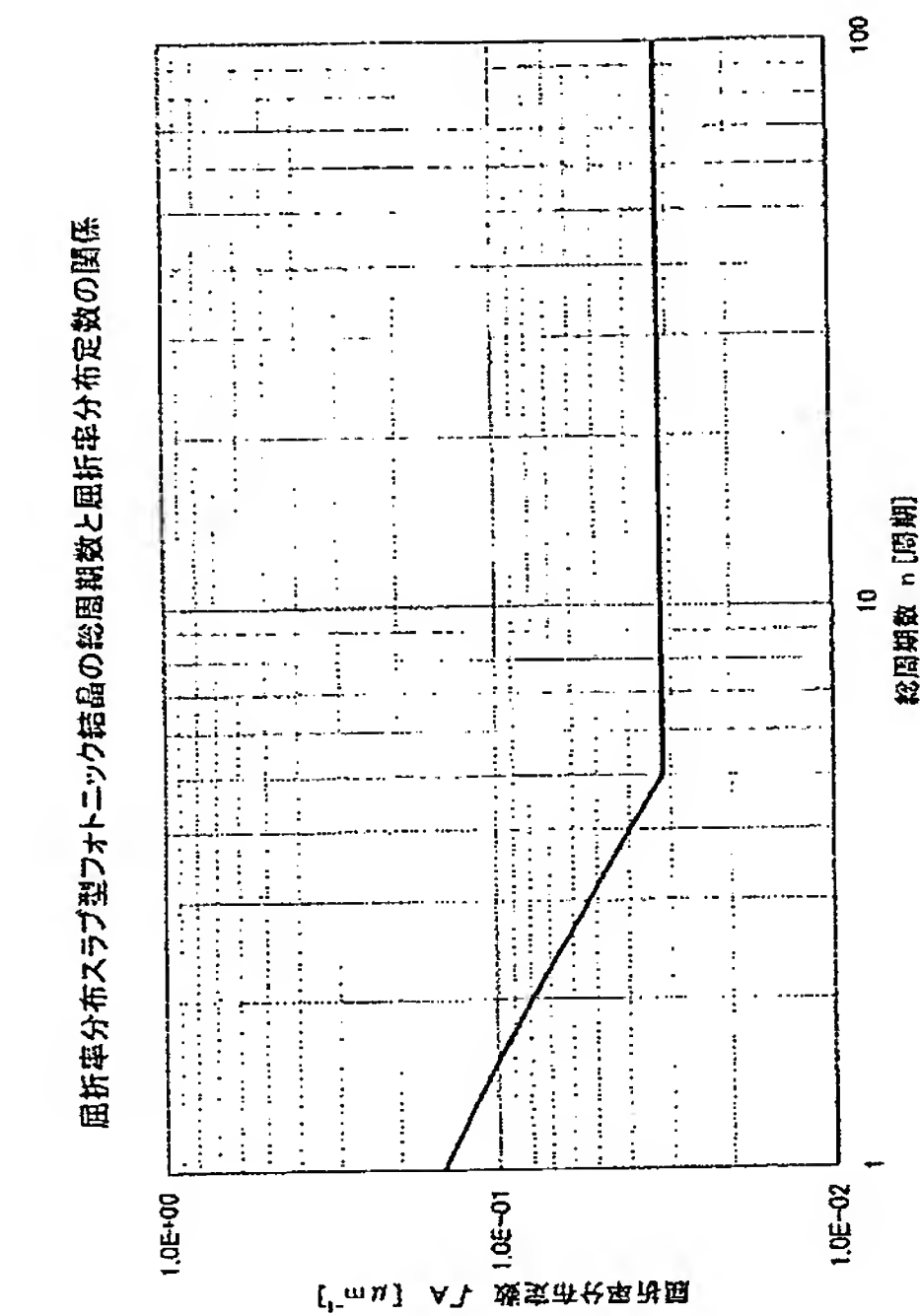
【図 1】



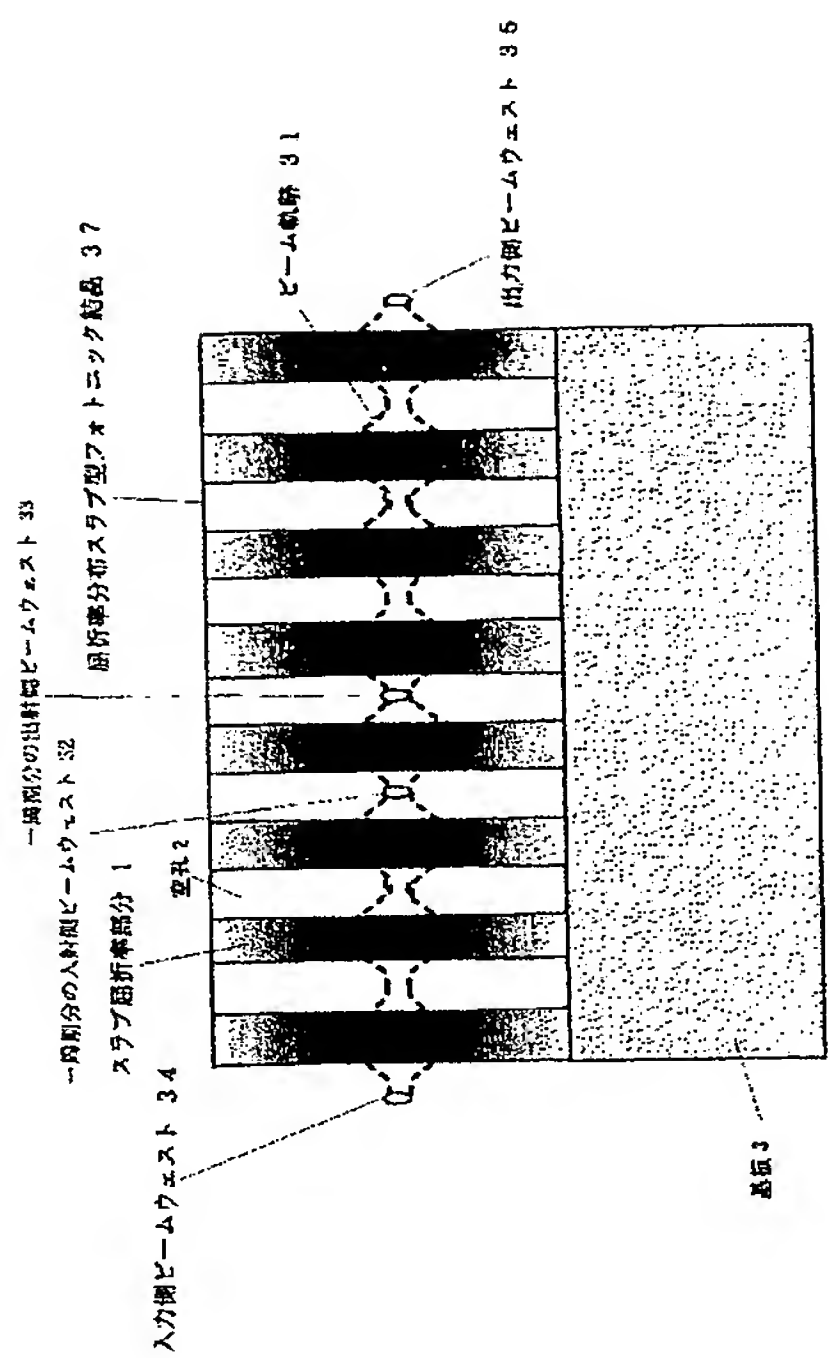
【図 2】



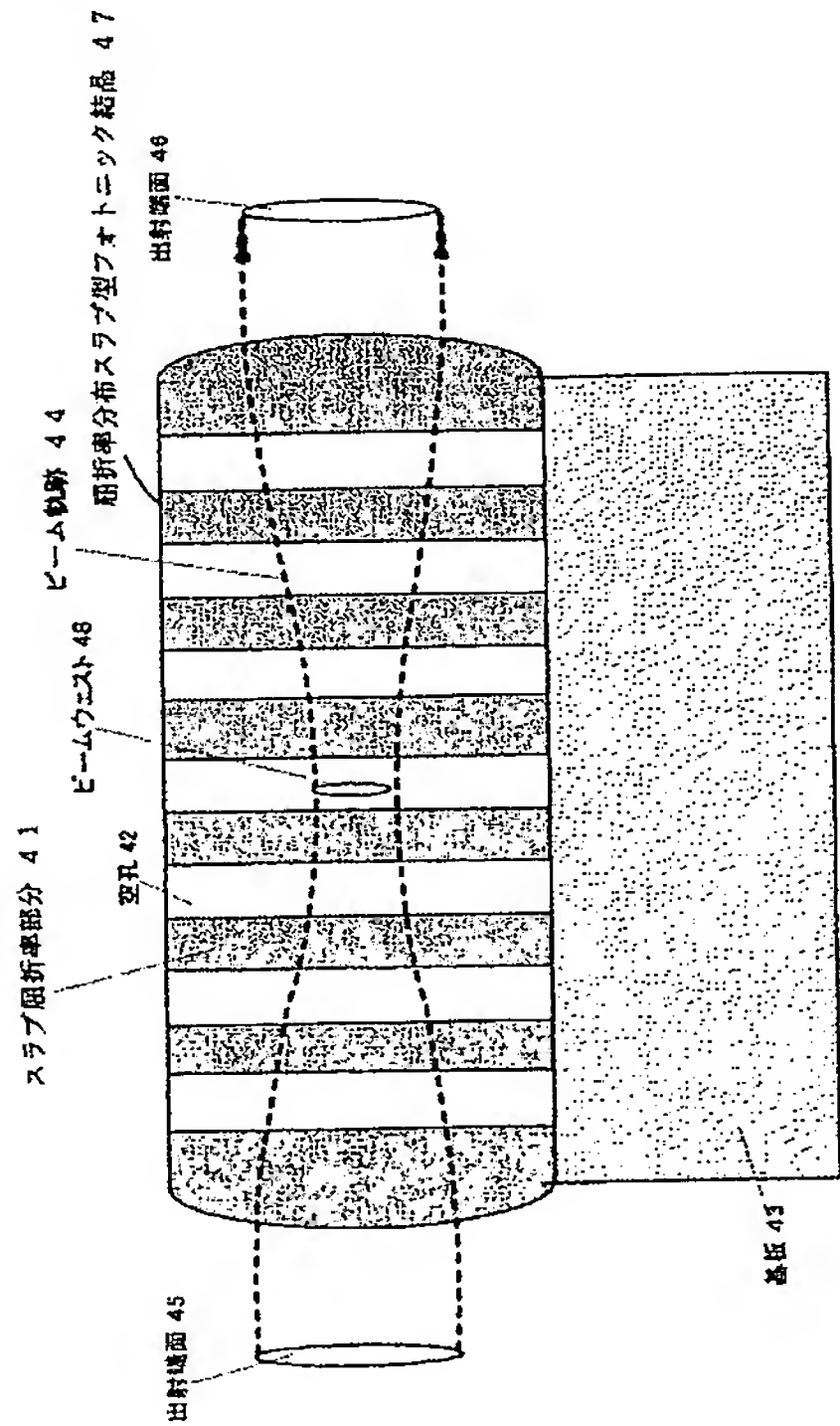
【図 3】



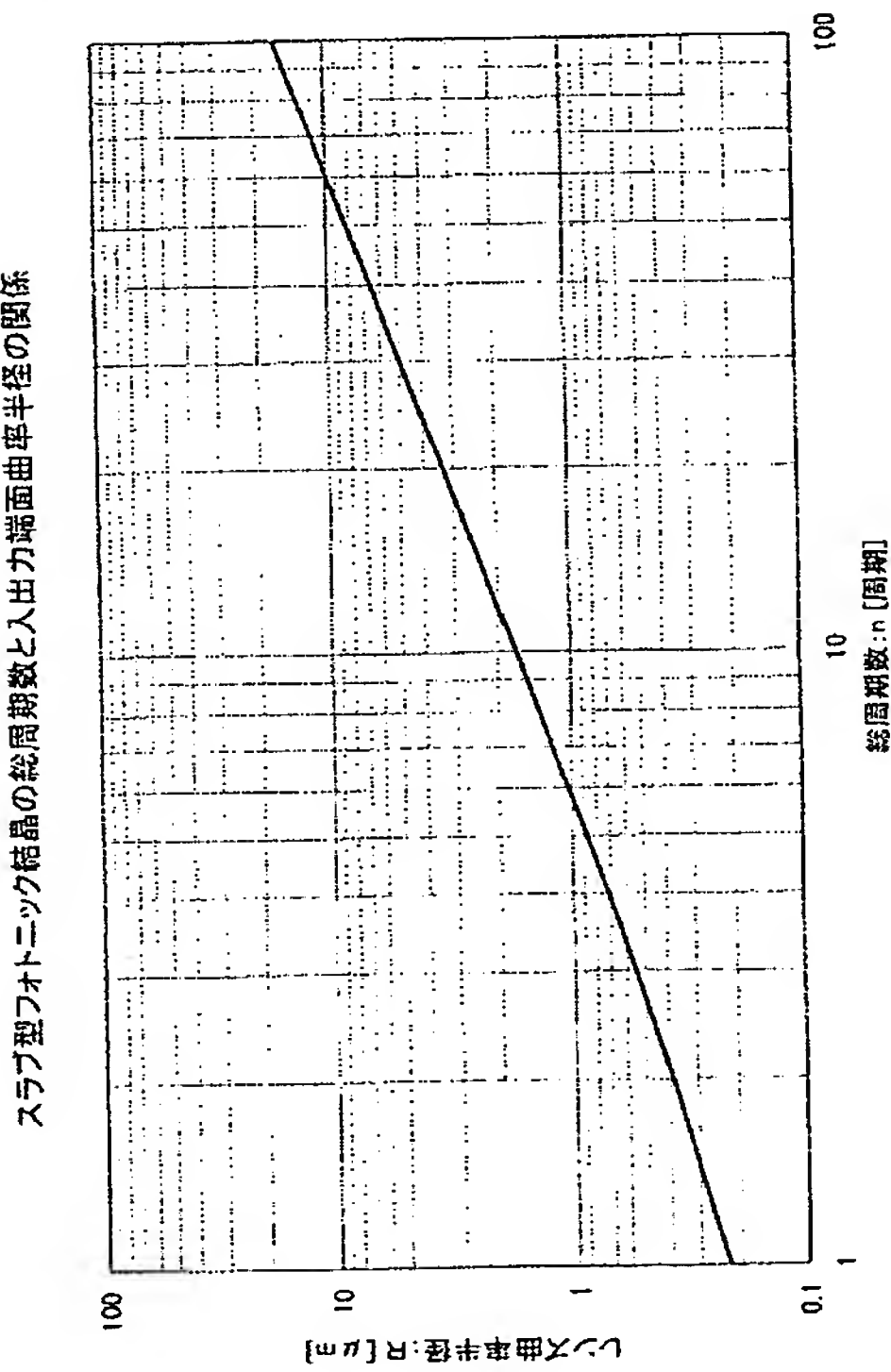
【図 4】



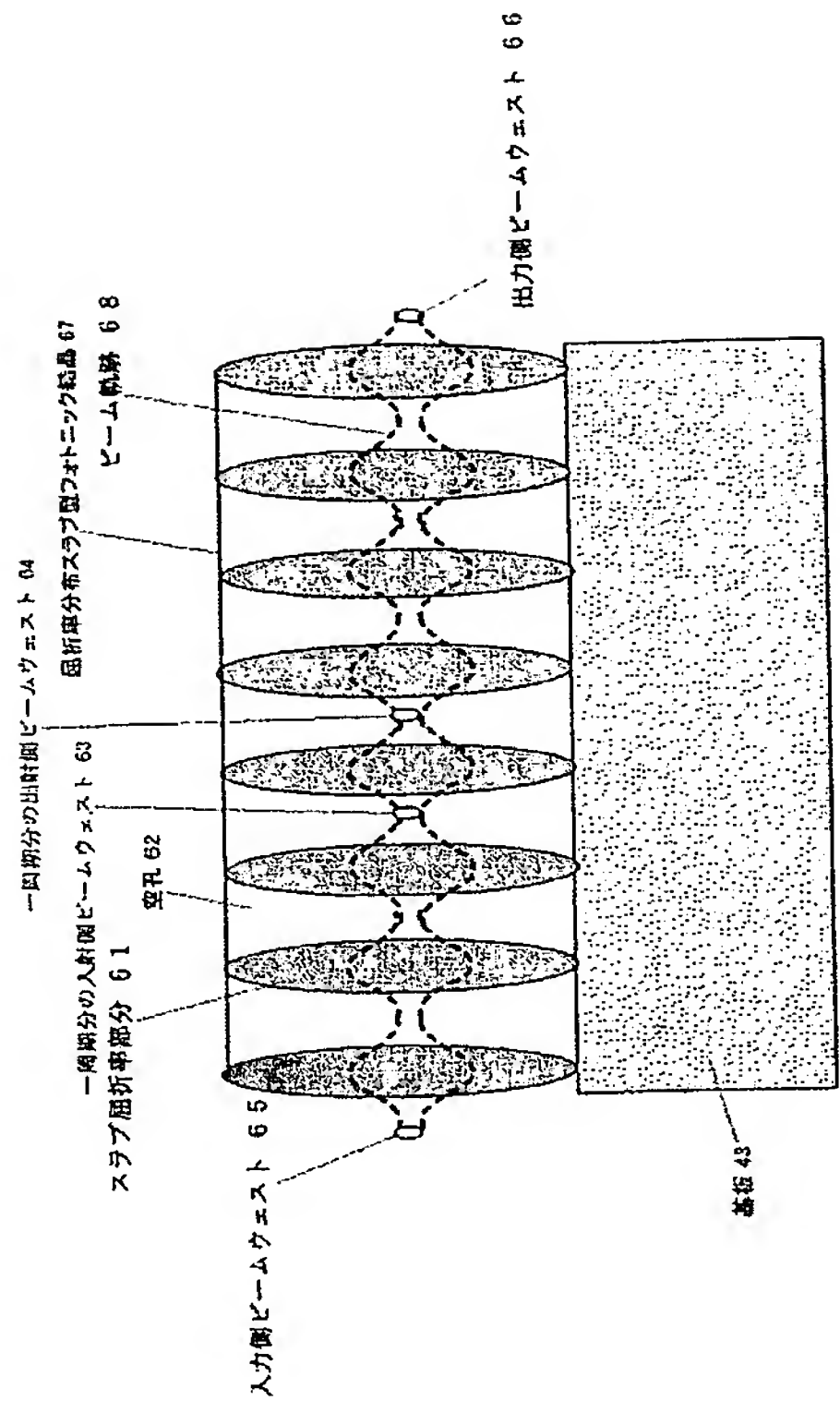
【図 5】



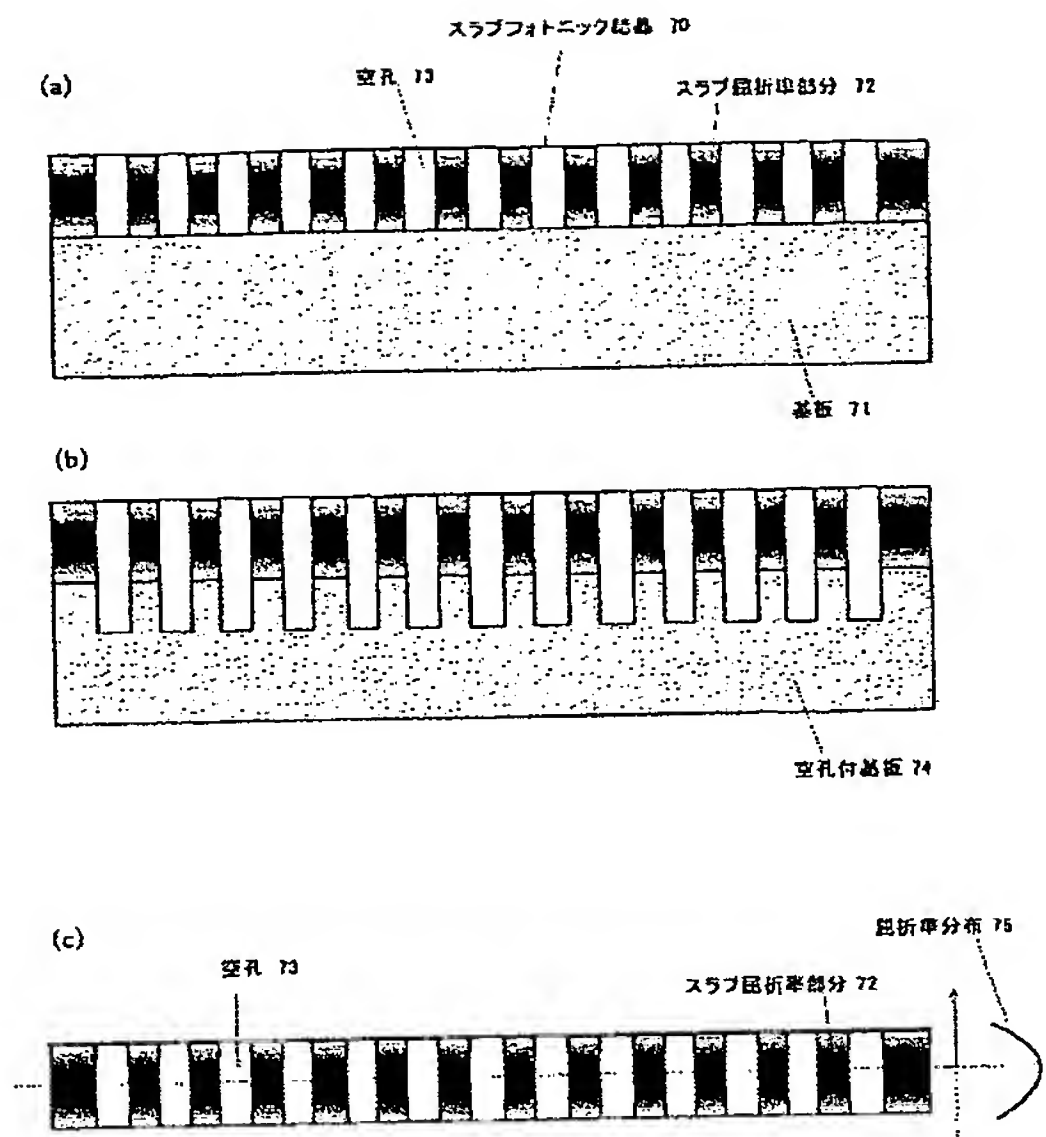
【図 6】



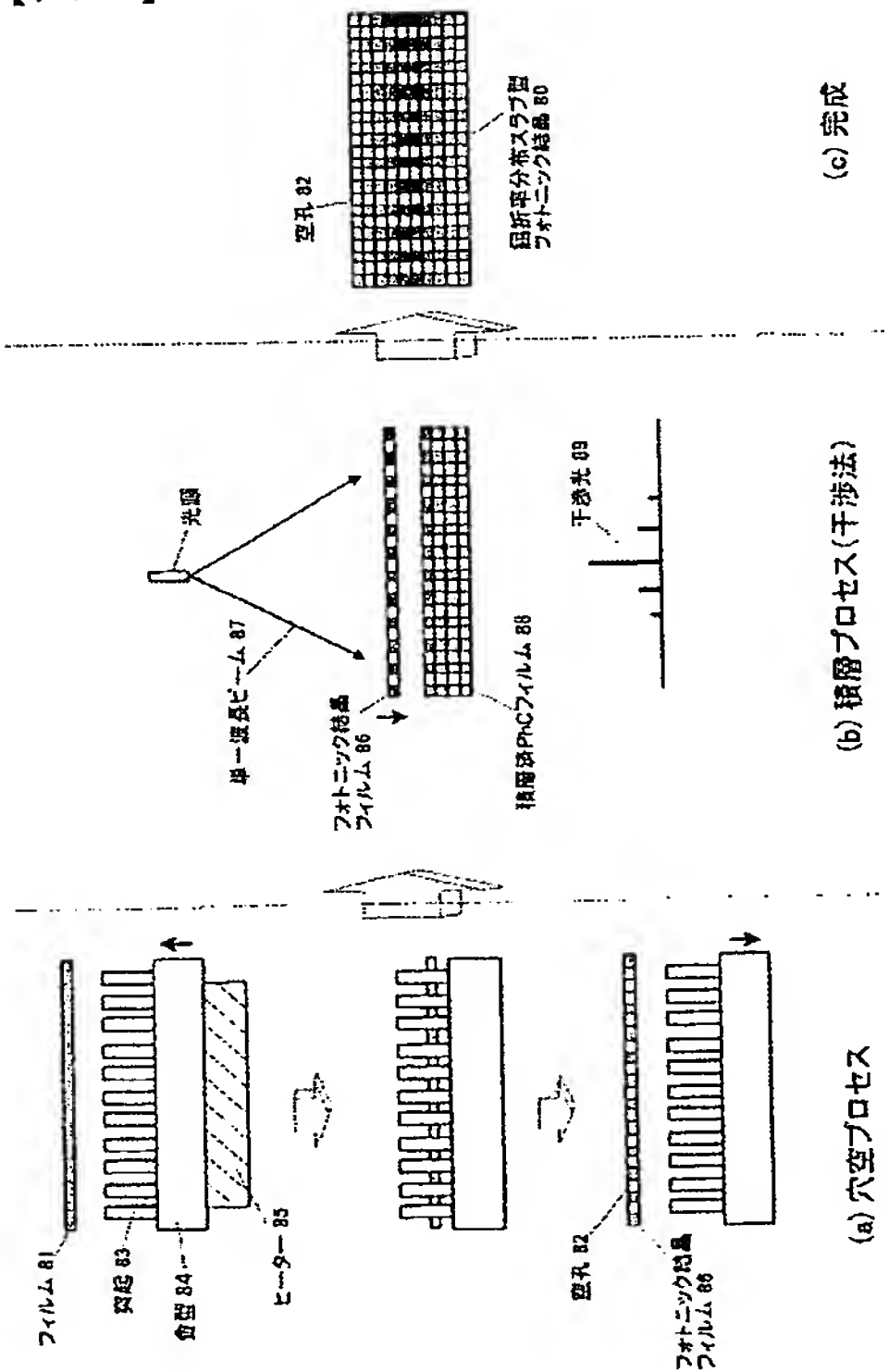
【図 7】



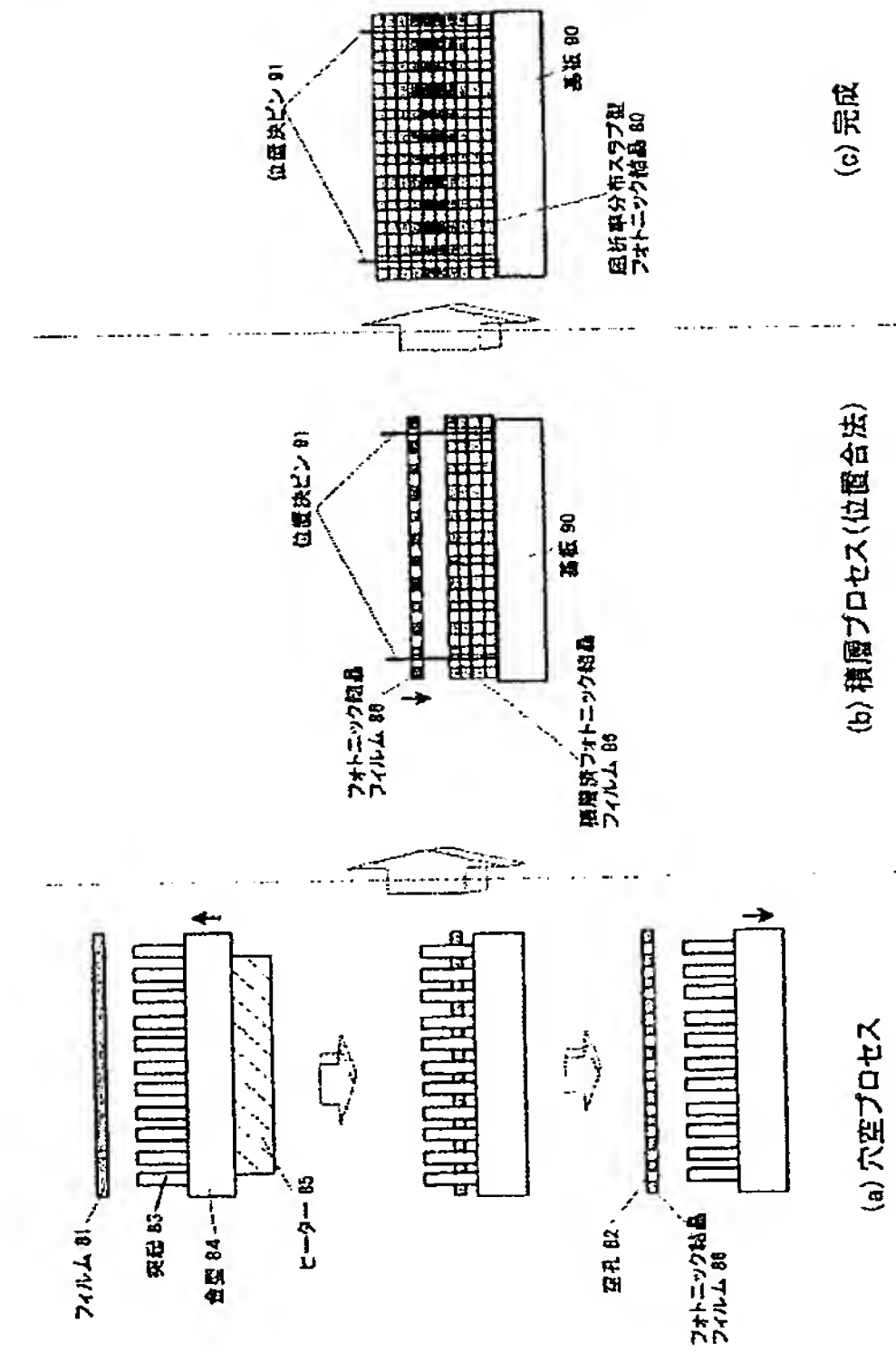
【図 8】



【図 9】

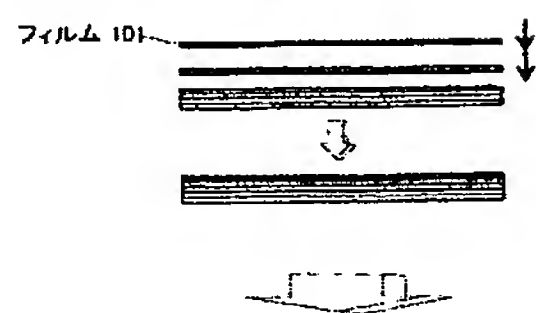


【図 10】

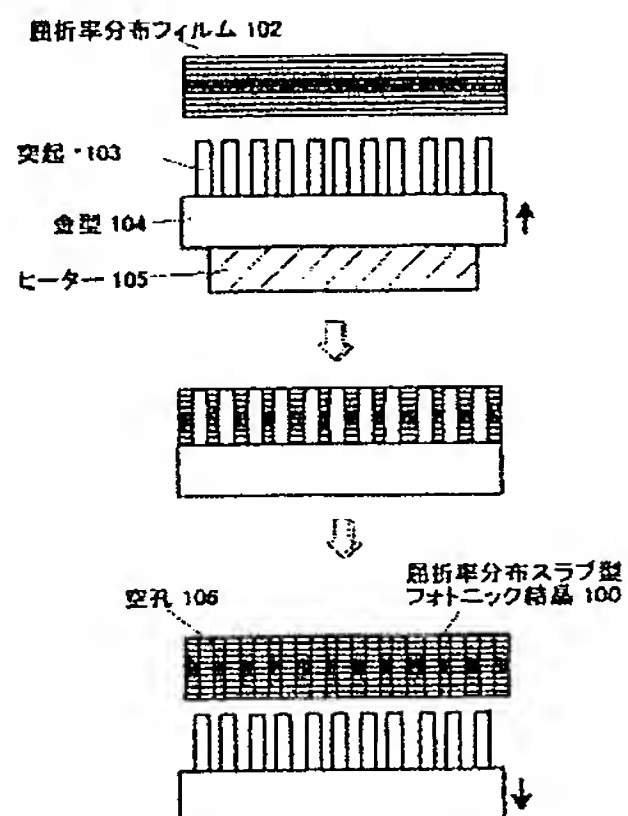


【図 1 1】

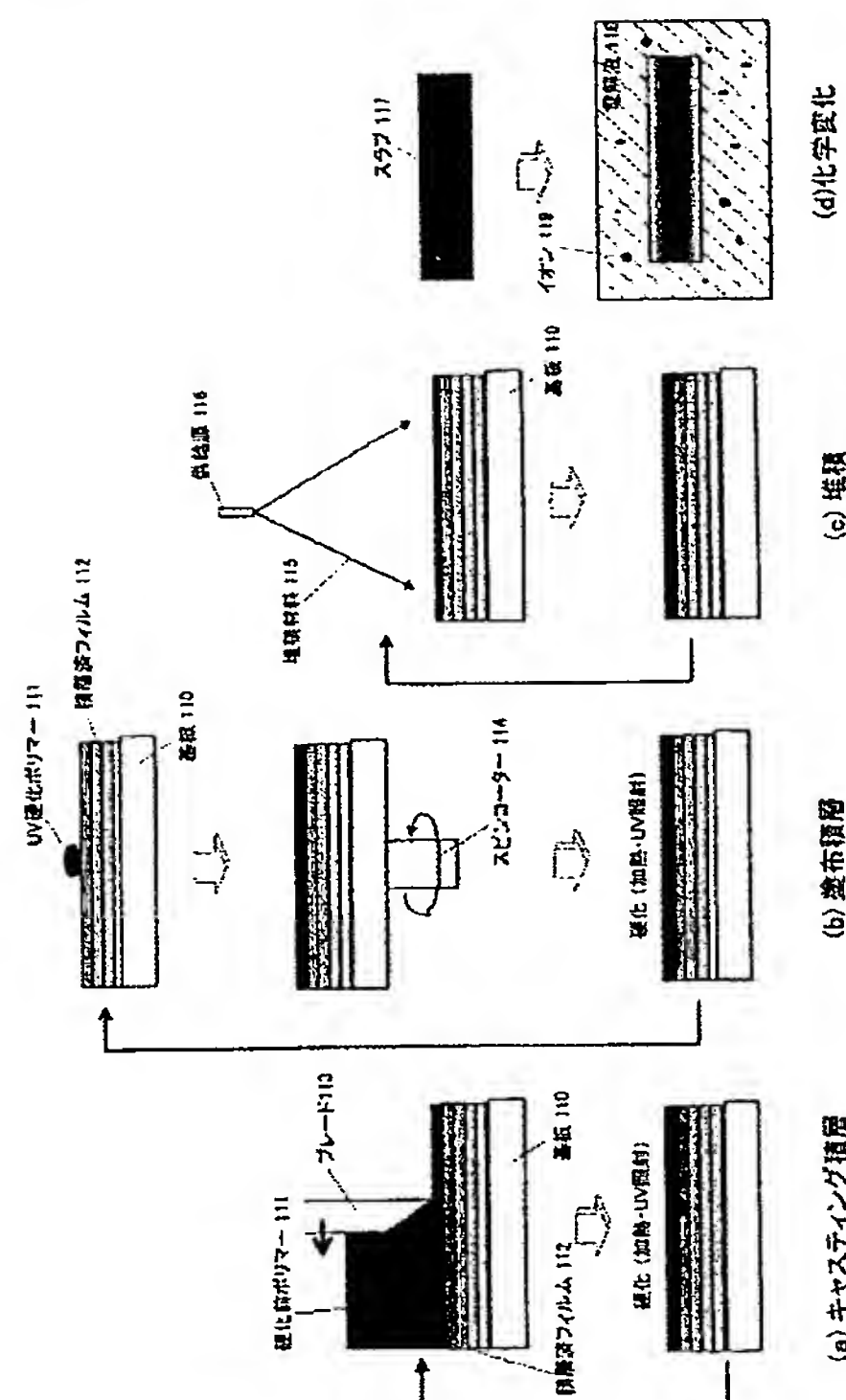
(a) 屈折率分布フィルム作製プロセス



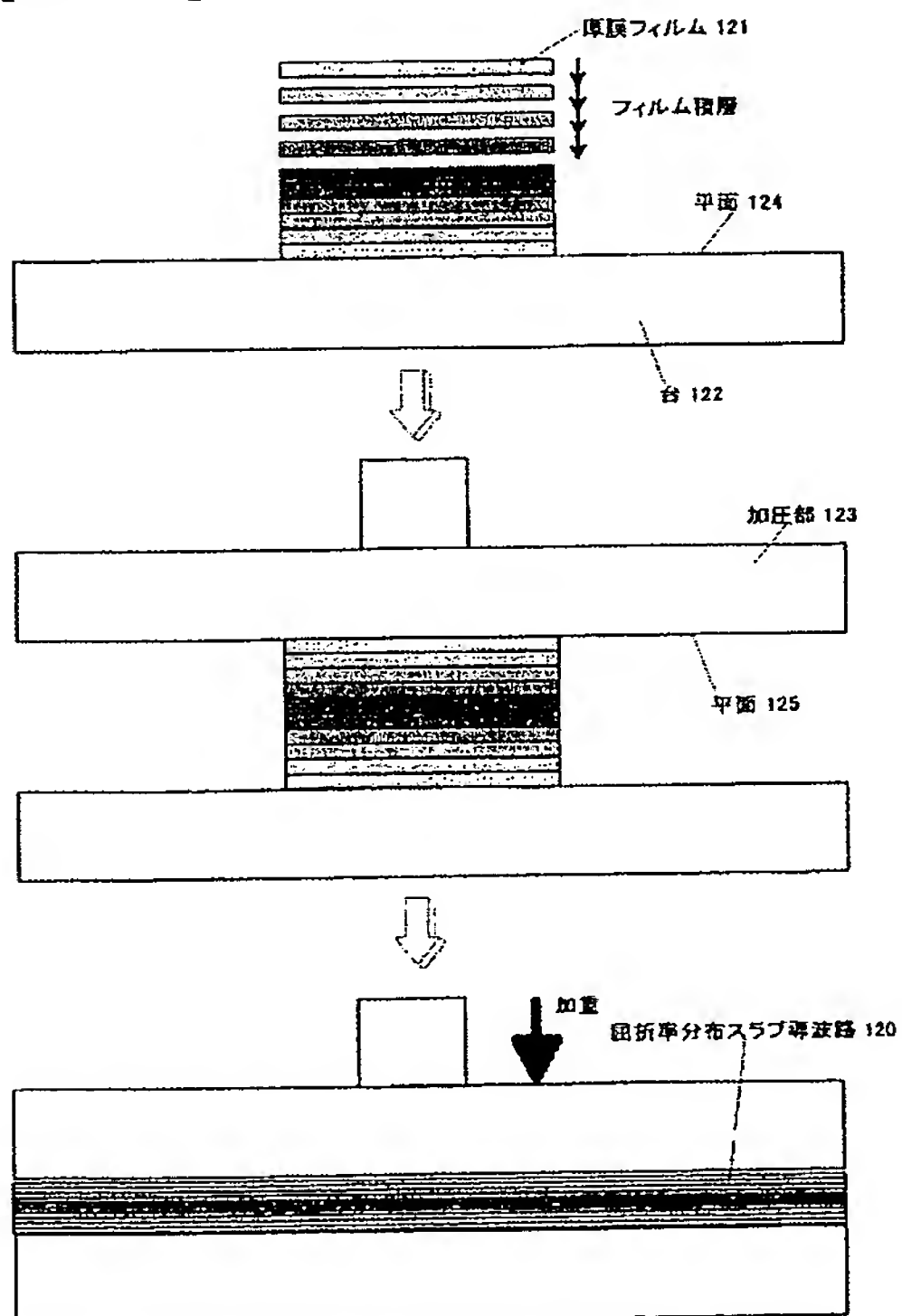
(b) 穴空プロセス



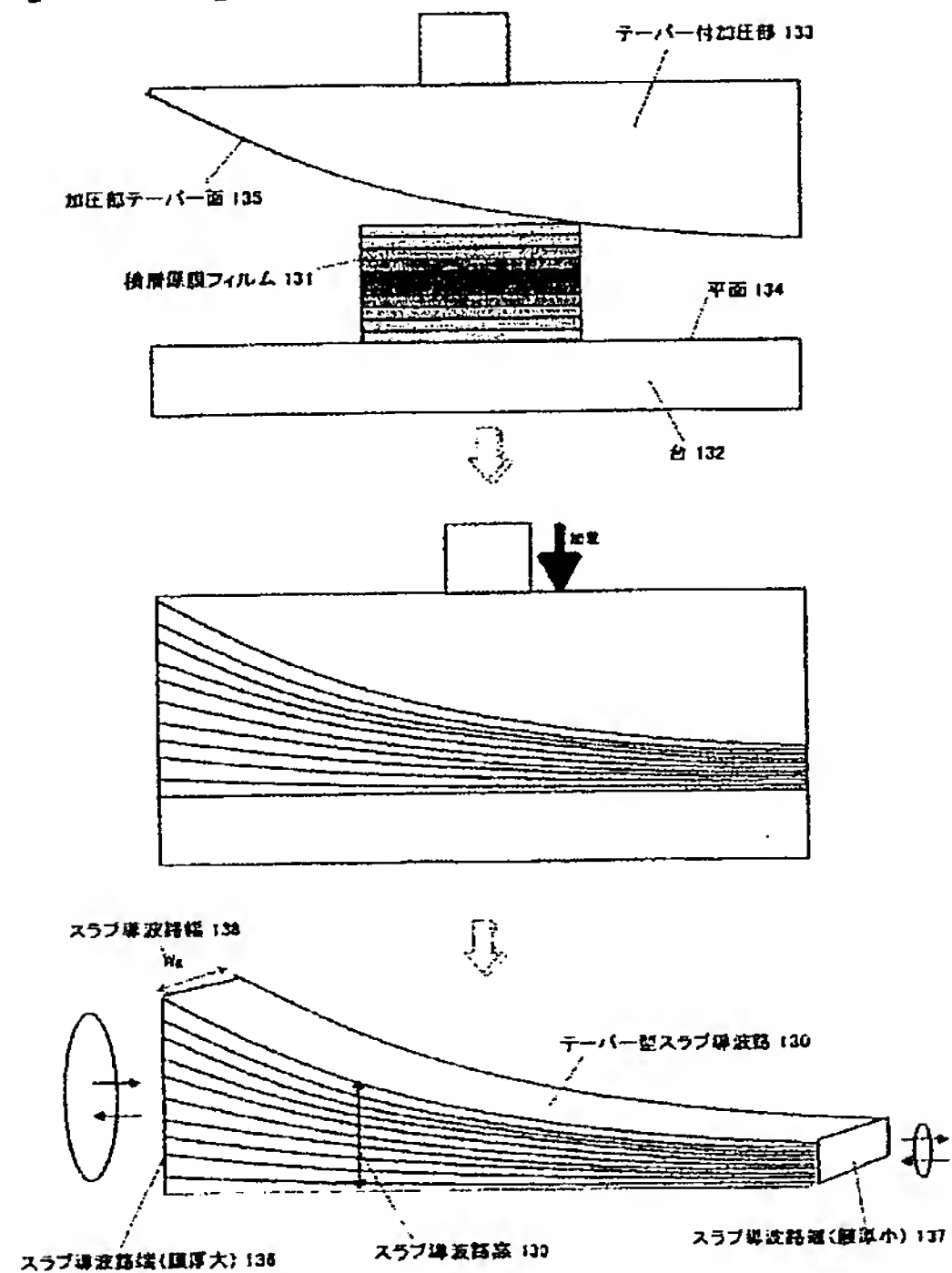
【図 1 2】



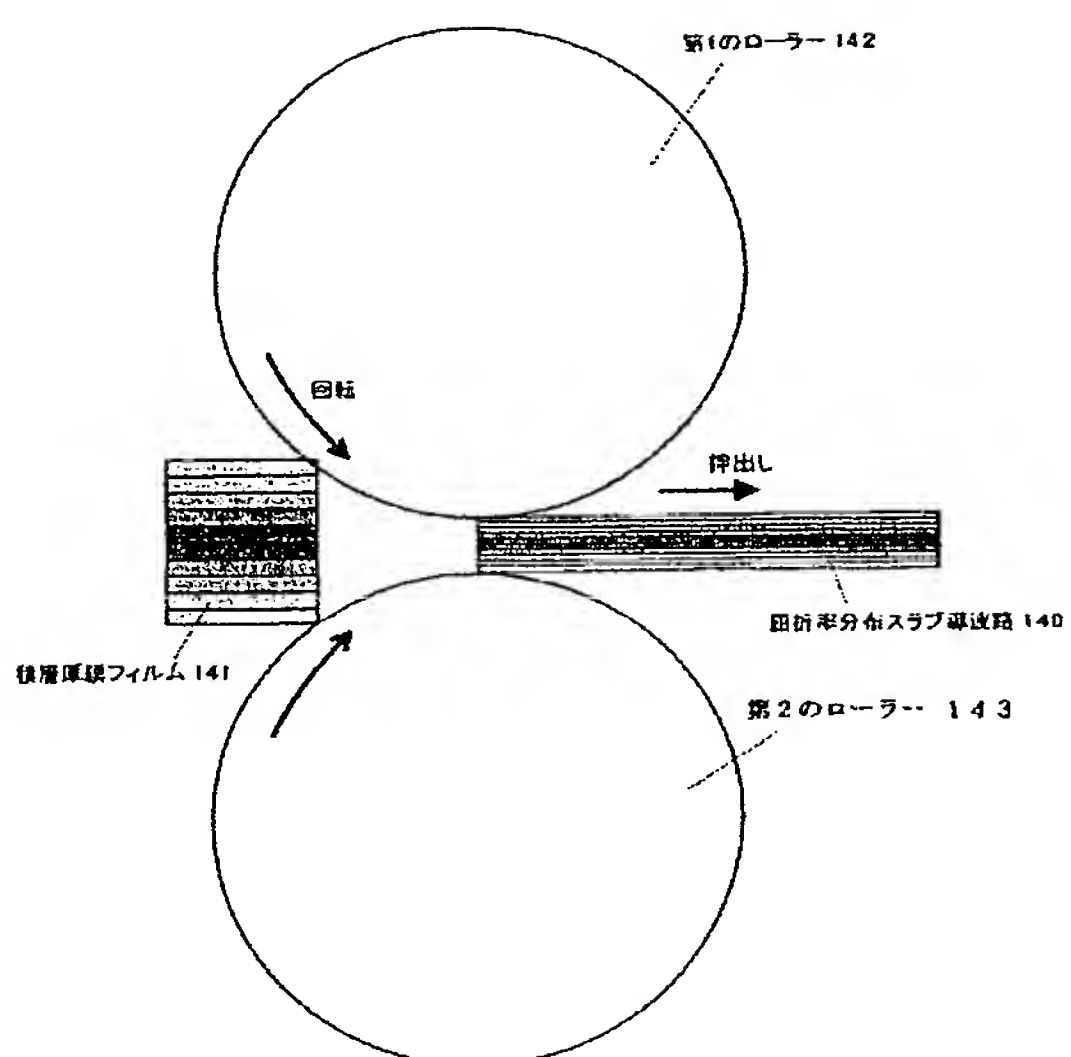
【図 1 3】



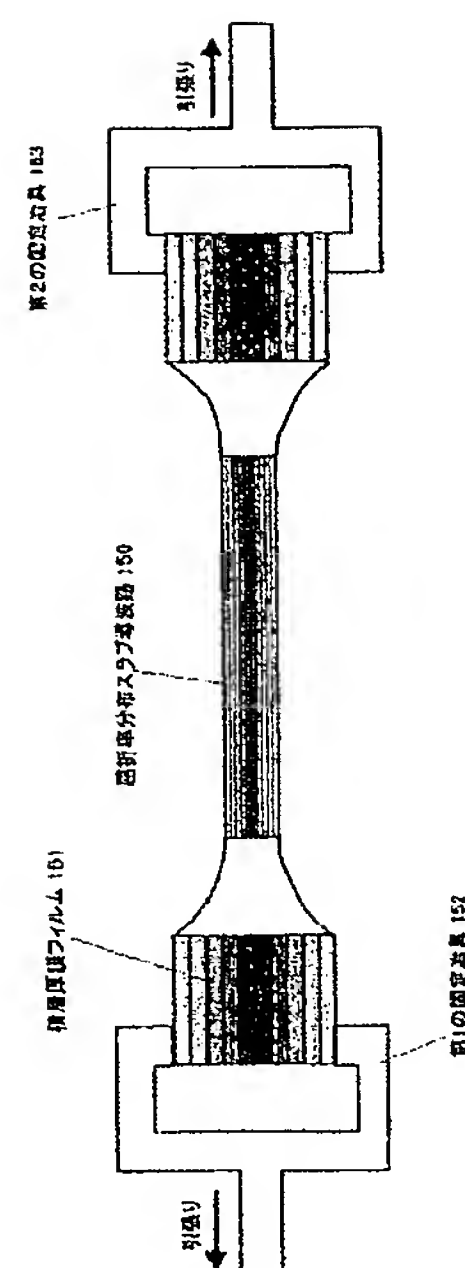
【図 1 4】



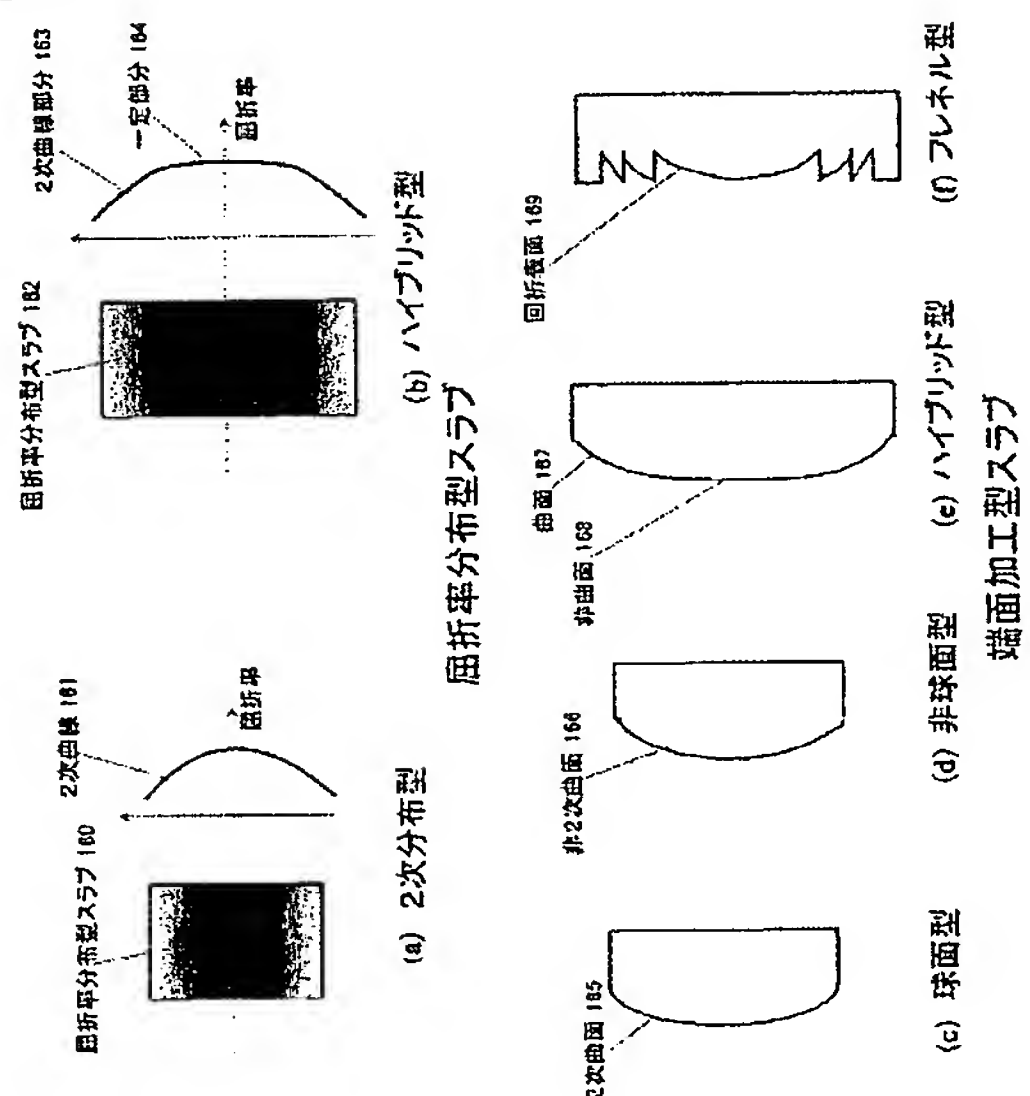
【図 15】



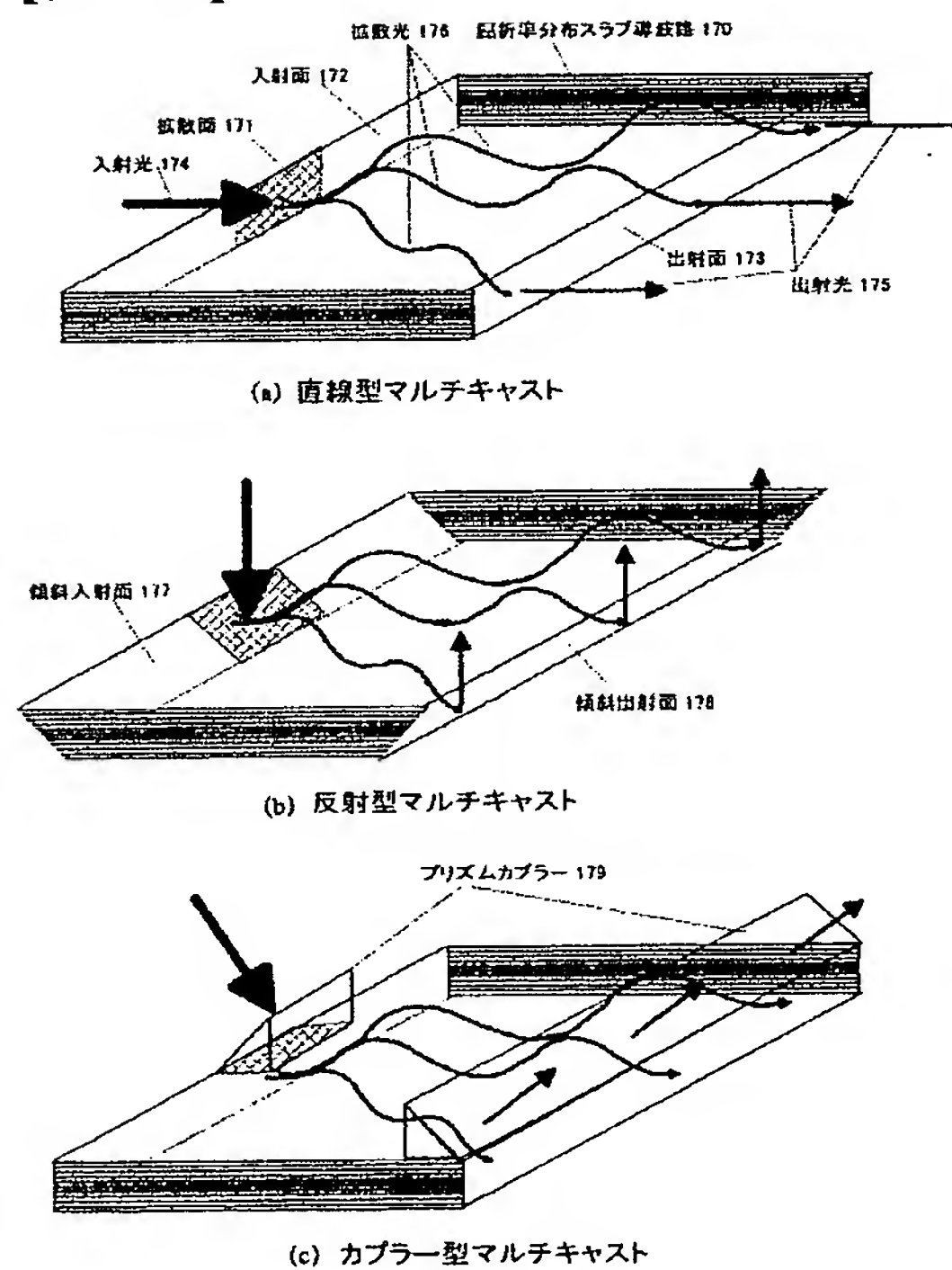
【図 16】



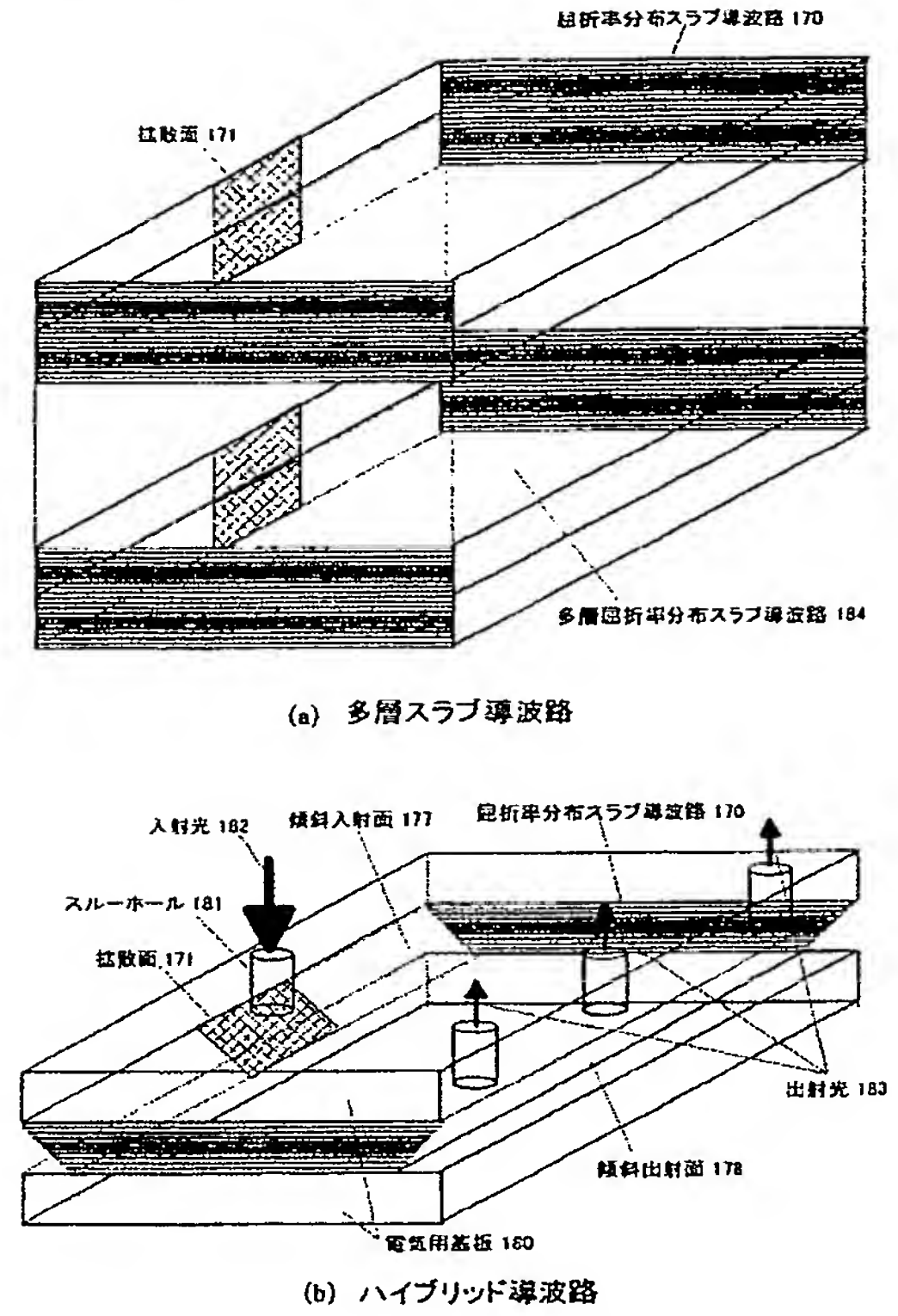
【図 17】



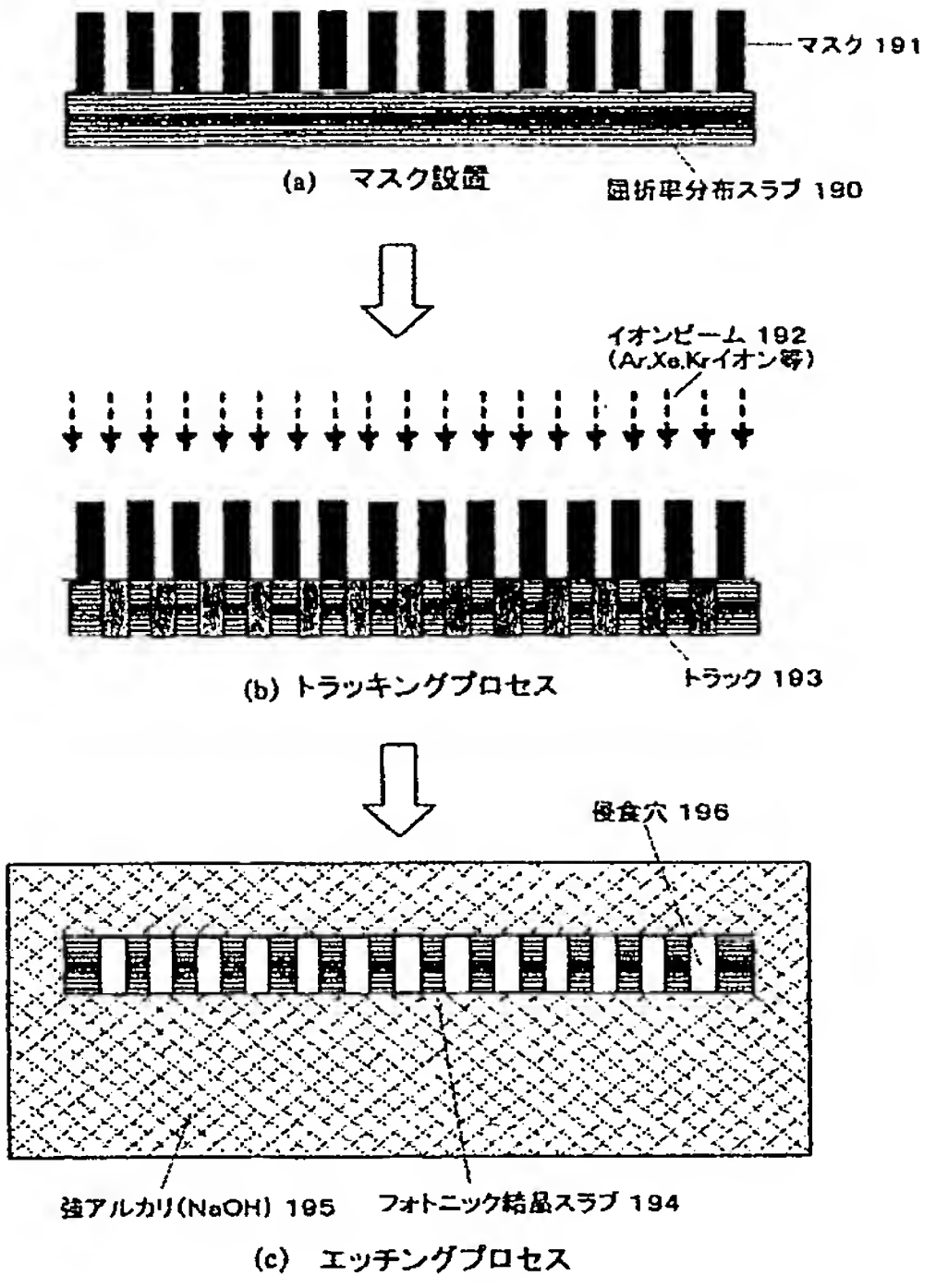
【図 18】



【図 19】



【図 20】



【図 21】

